

# Импактные структуры

---

**Е.П. Гуров**

Институт геологических наук НАН Украины, Киев

## ИМПАКТНЫЕ СТРУКТУРЫ В МОРЯХ И ОКЕАНАХ

---

*На поверхности Земли к настоящему времени диагностировано 188 импактных структур, число которых ежегодно увеличивается. Из них шесть кратеров образованы в морских условиях и полностью или частично находятся под поверхностью моря. Кроме того, из общего числа расположенных на континентах импактных структур для 21 установлено образование в морских условиях и последующее выведение на сушу в результате тектонических процессов. Хотя океаны и моря занимают 71 % поверхности Земли, только для 14 % импактных структур доказано образование в морских условиях. Это объясняется молодым возрастом океанического дна, поглощением кинетической энергии ударников толщей воды, а также трудностями поисков и открытия подводных импактных структур.*

**Ключевые слова:** импактная структура, астероид, цунами, суспензионный поток, брекчия.

### Введение

Ударное кратерообразование — один из важнейших факторов формирования поверхности Земли и планет земной группы. В то же время геологическая активность земной коры, атмосферы и гидросферы определяет высокую скорость уничтожения следов метеоритной бомбардировки, в результате которой на поверхности сохранилась только небольшая часть импактных структур преимущественно мезо-кайнозойского возраста. Многие из них в различной степени эродированы, что затрудняет поиски и открытие новых, ранее не известных импактных структур.

К настоящему времени на поверхности Земли установлено 188 достоверных импактных структур [21]. Из этого числа только шесть кратеров расположены в пределах морей и океанов или частично находятся под водной поверхностью. Еще 21 структура была образована в подводных условиях, но в настоящее время располагается на суше [17, 19, 24]. На Земле общая площадь поверхности суши составляет 149 млн км<sup>2</sup>, или 29 % ее поверхности, в связи с чем преобладающая часть падений астероидов и комет происходит в моря и океаны. Столь редкое распространение

© Е.П. ГУРОВ, 2016

установленных подводных кратеров объясняется объективными и субъективными причинами. К первым относится молодой возраст океанического дна, а также поглощение кинетической энергии ударника толщей воды в точке импакта. При этом сила удара о дно бассейна зависит от соотношения диаметра астероида и мощности слоя воды в месте падения. В результате в глубоководных областях океанов падение космических тел небольшого диаметра не приводит к образованию кратера в поверхности дна, но реализуется в испарении значительных объемов воды и образовании цунами [18]. Субъективные причины трудности установления подводных кратеров связаны с условиями их обнаружения, при которых дистанционные методы поисков не могут быть использованы, и только геофизические исследования позволяют их выявлять. Кроме того, диагностика подводных импактных структур требует проведения буровых работ, в то время как ударная природа многих наземных кратеров была установлена в результате изучения естественных обнажений без бурения.

### Подводные импактные структуры

На поверхности Земли диагностированы шесть кратеров, образованных в подводных условиях и полностью или частично находящихся под поверхностью моря (рис. 1, таблица).

**Кратер Чиксулуб** в Мексике представляет наибольший интерес как импактная структура, вызвавшая катастрофические события в конце мелового периода и определившая радикальные изменения органического мира на рубеже мезозойской и кайнозойской эр [36, 44, 45]. Основой для этих представлений послужило открытие Л. Альваресом и его сотрудниками в осадочных породах на границе верхнемеловых и нижнепалеогеновых отложений пограничного слоя глины с аномально высоким содержанием иридия и некоторых других элементов платиновой группы. Так как их содержание в метеоритах в тысячи — сотни тысяч раз больше, чем в породах земной коры, было высказано предположение об образовании «иридиевого слоя» в результате столкновения с Землей крупного астероида [11]. Дальнейшее изучение пограничного мел-палеогенового слоя, уста-

#### Подводные импактные кратеры на поверхности Земли

Название структуры	Расположение	Широта	Долгота	Диаметр кратера км	Возраст млн лет	Состав мишени	Состав ударника
Чиксулуб Chicxulub	Мексика	21°20' С	89°30' З	180	66,07 ± 0,37	Осад.+крист.	Хондрит
Монтанье Montagnais	Канада	42°53' С	64°13' З	45	50,50 ± 0,76	То же	Не установ.
Чесапик Chesapeake	США	59°20' С	76°1' З	80	35,5 ± 0,3	То же	»»
Мьельнир Mjolnir	Норвегия	73°48' С	29°40' В	40	142,0 ± 2,6	Осад.	»»
Нигрунд Neugrund	Эстония	59°20' С	23°40' В	20	~535	То же	»»
Кярдла Kärdla	Эстония	59°1' С	22°46' В	7	~455	Осад.+крист.	»»

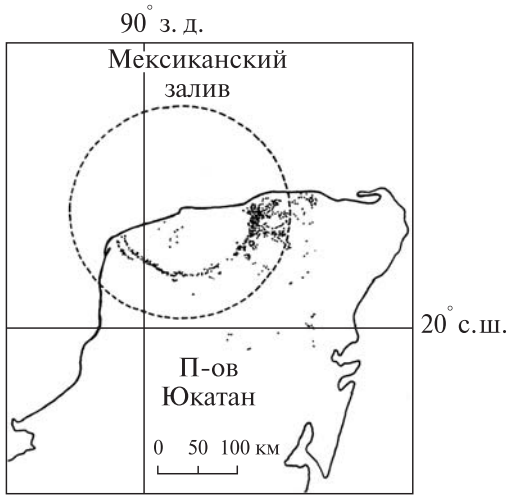


**Рис. 1.** Импактные структуры на поверхности Земли: • — на поверхности суши, ★ — образованные в морских условиях; импактные структуры, образованные в морских условиях: 1–7 — под поверхностью моря: кратеры: 1 — Чиксулуб, 2 — Монтанье, 3 — Чесапик, 4 — Мьелнир, 5 — Нигрунд, 6 — Кьярдла; 7 — импактная структура Элтанин; 8–11 — кратеры, выведенные на сушу тектоническими процессами (описанные в статье): 8 — Карский, 9 — Оболонский, 10 — Каменский (по [20, 21] с изменениями), 11 — Уэтампка

новление его глобального распространения и особенностей геохимического и минерального состава подтвердили его связь с образованием гигантской импактной структуры. Открытие в Карибском бассейне толщ грубообломочных пород на границе верхнемеловых и нижнепалеогеновых отложений позволило ограничить территорию поисков кратера центральноамериканским регионом. Диагностика структуры была выполнена при повторном изучении керна восьми нефтепоисковых скважин, пробуренных в северной части полуострова Юкатан в пределах сложной гравитационной аномалии неизвестного происхождения [25]. Были получены доказательства расположения в этом районе гигантской погребенной импактной структуры, получившей наименование Чиксулуб по названию поселка в ее центральной части. В результате геофизических исследований и изучения материалов бурения получены данные о главных параметрах кратера, его внутреннем строении, составе комплекса импактитов и их возрасте [25, 26, 37, 38, 46].

На основании состава пород позднемелового возраста установлено, что в месте падения астероида существовал мелководный морской бассейн.

Кратер Чиксулуб диаметром около 180 км расположен в северной части полуострова Юкатан и на прилегающей территории Мексиканского залива, причем северный берег полуострова разделяет его в субширотном направлении на две приблизительно равные части. Кратер не выражен в рельефе и не диагностируется на космических снимках. Единственное отражение на поверхности его сложного кольцевого строения — система заполненных водой карстовых провалов — сенот — диаметром от 30 до 300 м каждая, сгруппированных в виде обращенной к югу дуги диаметром около 160 км (рис. 2) [26]. По данным геофизических исследований, кратеру соответствует отрицательная гравитационная аномалия интенсивностью до  $-30$  мГал, в строении которой выделяется до четырех



**Рис. 2.** Кратер Чиксулуб на полуострове Юкатан и в Мексиканском заливе: - - - - — границы кратера при диаметре 250 км по [38]; ••• — положение карстовых провалов — се- нот — в виде дуги диаметром 160 км по [26]

концентрических знакопеременных кольцевых зон вокруг находящегося в центре относительного гравитационного максимума [46].

Мишень импактной структуры — комплекс кристаллических пород фундамента возрастом около 545 млн лет [3, 6, 46], на поверхности которого залегают осадочные отложения мелового возраста мощностью 1,6—2,0 км, пред-

ставленные доломитами, ангидритами и известняками. В пределах Юкатанской платформы разрез этих отложений завершается осадками маастрихта, образовавшимися в условиях морского бассейна глубиной около 50 м к моменту удара [46].

В центральной части кратера скважинами, которые не достигли его основания, вскрыт сложный комплекс импактитов, представленных зювитами и ударнорасплавленными породами общей мощностью более 1700 м. Импактные породы содержат отчетливые проявления ударного метаморфизма. Расплавные импактиты образуют неоднородную по строению толщу еще не установленной мощности, состав которой колеблется от андезитового до дацитового и близок к составу подвергшихся ударному плавлению пород кристаллического основания. В краевых частях структуры и за ее пределами на расстоянии до 200 км от центра вскрыта толща аллогенных брекчий и зювитов мощностью от 200 до 600 м, залегающих на поверхности дислоцированных верхнемеловых пород основания кратера [46]. Распространение мощной толщи брекчий и зювитов за пределами структуры затрудняет определение параметров кратера, в результате чего его диаметр оценивается от 180 км [26], до 250—270 км по краям внешнего кольцевого поднятия [37, 38].

В настоящее время кратер Чиксулуб перекрыт толщей осадочных отложений палеогена мощностью около 0,8 км в его периферических частях и до 1,5 км в центральной области структуры [46].

Абсолютный возраст ударнорасплавленных пород из кратера и окружающих его выбросов по последним данным равен  $66,07 \pm 0,37$  млн лет и принимается как возраст мел-палеогенового рубежа [27].

Образование кратера Чиксулуб сопровождалось сложным комплексом катастрофических событий. В то время как выброс гигантского газо-пылевого плаума, отложение баллистических выбросов и землетрясения произошли в течение минут — часов после удара, некоторые последствия в виде осадения пылевого материала, выпадения кислотных дождей и ряда других явлений длились в течение месяцев — лет — десятилетий [36, 44, 53].

Отложения ближних баллистических выбросов в виде толщ брекчий из обломков и глыб кристаллических и осадочных пород мишени распространены на

полуострове Юкатан и в Мексиканском заливе на расстоянии сотен километров от центра структуры [41, 49, 50].

Одним из важнейших последствий ударного события была генерация землетрясения, амплитуда которого оценивается 12,8 баллов вблизи краев кратера; площадь территории вокруг структуры, подверженная землетрясению с магнитудой от 9 баллов и выше, составила по расчетам около 3—4 млн км<sup>2</sup> [14]. Важнейшим следствием землетрясения стало нарушение сплошности слабо консолидированных осадков верхнемеловых отложений не только на Юкатанской платформе, но и в пределах Карибского бассейна и Западной Атлантики, что сопровождалось сползанием под действием силы тяжести толщ осадков по континентальному склону [15]. К востоку от побережья Флориды и Джорджии на глубине от 1300 до 2670 м слабо консолидированные к моменту удара отложения маастрихта сползли по континентальному склону по сохранившейся устойчивости поверхности сеноманских отложений с образованием брекчированных и смятых в крутые и опрокинутые складки толщ пород с размером блоков до 1 км<sup>2</sup> [15, 40].

Образование суспензионных потоков происходило при обрушении и оползании под действием силы тяжести нарушенных землетрясением пород при их отрыве от субстрата и перемещении в водной среде на значительные расстояния в более глубоководные участки с осаждением в виде толщ брекчий. В отличие от описанных выше гравитационных оползневых образований, отложения суспензионных потоков характеризуются грубой градационной слоистостью. Один из районов распространения отложений суспензионных потоков — залив Кампече в юго-западной части Мексиканского залива. В этом районе брекчии, перекрытые мощной толщей палеогеновых осадков и смятые в пологие складки, содержат гигантские запасы углеводородов, в том числе 4,5 млрд тонн нефти и 424 млрд м<sup>3</sup> газа [12, 16]. Хотя добыча углеводородов на этих месторождениях продолжается уже несколько десятилетий, расшифровка брекчий как отложений суспензионных потоков в результате образования кратера Чиксулуб стала возможной только в 1990-х годах [16].

Отложения цунами, возникшего при образовании кратера, распространены в бассейне Карибского моря, в США от Алабамы до Техаса, в прибрежных районах Мексики, а также в Венесуэле и на севере Бразилии. Глубина морского бассейна к северу от кратера к моменту удара составляла 100—500 м [50]. По расчетам [35], при глубине морского бассейна около 200 м высота цунами на юге США достигала 115 м на расстоянии 1500 км от центра удара. Отложения цунами представлены толщами песчаников мощностью от 1 до 5 м, накопившихся в отрицательных формах рельефа. Наблюдается градационная слоистость от грубозернистых песчаников с обломками в основании до тонкозернистых в верхней части [40].

Кратко охарактеризованные типы отложений распространены вокруг импактной структуры на расстоянии порядка 1500—2500 км от ее центра [15, 49, 50]. В то же время дальние выбросы кратера Чиксулуб в виде пограничного мел-палеогенового слоя глины имеют глобальное распространение. Они установлены более чем в 300 пунктах по всей поверхности Земли, в том числе по данным глубоководного бурения — в 38 точках в океанах [15]. Детальные характеристики пограничного слоя, включая минералогические, геохимические и палеонтологические данные, имеются для многих точек Северной Америки, Европы, Северной Африки,



*Рис. 3.* Пограничный мел-палеогеновый слой глины на границе верхнемаастрихтских и нижнепалеогеновых известняков в карьере Куаглиотти в районе Губбио, Восточная Италия. Стрелками показаны остатки глины после извлечения образцов слоя на анализы. Цена деления на линейке — 1 см. Фото автора

Северной Атлантики. Ближайшие к территории Украины обнажения пограничного слоя описаны в Болгарии на побережье Черного моря в районе г. Бяла [10].

Дальние выбросы кратера Чиксулуб представлены пограничным слоем глины мощностью около 1 см. Впервые пограничный слой на границе с маастрихтскими и датскими отложениями выявлен и детально изучен Л. Альваресом и его сотрудниками в Губбио в Италии и Стевенс Клинт в Дании [11]. В Губбио пограничный слой глины мощностью 1 см залегает на поверхности светло-серых глубоководных известняков маастрихта и перекрыт розовыми известняками нижнего палеоцена (рис. 3).

Источником материала для образования слоя послужило вещество огненного шара, выброшенное из кратера в стратосферу и распространившееся над всей поверхностью Земли под действием силы тяжести в течение суток. Затемнение атмосферы тонкопылеватым материалом плума на период от полугода до года прекратило доступ солнечной энергии к земной поверхности и послужило главной причиной массового вымирания животного мира на рубеже мел—палеоген [36, 44, 45].

Наибольшее распространение в составе пограничного слоя имеют смектит, глауконит и некоторые другие глинистые минералы. Постоянно присутствуют ударнометаморфизованный кварц, сферулы санидина, никельсодержащая шпинель конденсационного происхождения, а также установленные в некоторых разрезах пограничного слоя импактные алмазы [36]. Важная особенность состава пограничного слоя — постоянное присутствие частиц сажи микронного размера, которые свидетельствуют о выгорании растительности в результате выпадения из огненного шара частиц ударного расплава [13].

Геохимические исследования пограничной глины позволили установить в ее составе аномальное содержание иридия и некоторых других элементов платиновой группы, а также никеля и хрома [11, 31]. При содержании иридия в земной коре 0,01 нг/г, в пограничном слое оно колеблется от 0,1 до 87 нг/г [15]. Исходя из представлений о том, что преобладающая часть кратерообразующего астероида испаряется и входит в состав вещества огненного шара, выполнены подсчеты общей массы некоторых элементов в составе пограничного мел-палеогенового слоя глины. По содержанию в нем элементов платиновой группы и их соотношениям установлен хондритовый состав астероида, подтвержденный находками частиц метеоритного вещества в составе пограничного слоя в Тихом океане [31]. Диаметр астероида оценивается в 8—10 км при плотности слагающего его вещества около 2,0 г/см<sup>3</sup>. При предполагаемой скорости ударника 20 км/с, энергия



образования кратера Чиксулуб принимается равной порядка  $10^8$  Мт в тротиловом эквиваленте ( $1 \text{ Мт} = 4,2 \cdot 10^{15}$  дж) [36, 53].

Установление массового вымирания органического мира на мел-палеогеновом рубеже позволило доказать его связь с катастрофическим ударным событием и привело к пониманию роли ударных процессов в развитии и эволюции органического мира. Со времени открытия кратера Чиксулуб исследованию как геологических, так и экологических и биологических последствий этой космической катастрофы посвящены несколько тысяч научных публикаций [44, 45, 53]. В украинской геологической литературе краткий обзор строения кратера Чиксулуб и последствий его образования приведен в работах [1, 2].

**Кратер Монтанье** на шельфе Новой Шотландии в Северной Атлантике (таблица) — первая диагностированная на Земле подводная импактная структура [17, 19]. Выявлена при нефтепоисковом бурении в пределах отрицательной гравитационной аномалии. Кратер образован в породах кристаллического основания и осадочных отложениях платформенного чехла. Он имеет сложное строение и состоит из центрального поднятия и окружающей депрессии. Единственная скважина в его центральной части вскрыла комплекс зювитов и ударнорасплавленных пород с отчетливыми проявлениями ударного метаморфизма, которые позволили доказать импактное происхождение структуры [17].

**Импактная структура Чесапик** (таблица) расположена на восточном побережье США в заливе Чесапик и на шельфе Атлантического океана, частично охватывая прибрежные районы США и южную часть полуострова Делмарва. Кратер образован на глубине 200—300 м в кристаллических породах позднего протерозоя возрастом около 600 млн лет и осадочных отложениях от нижнемелового до верхнеэоценового возраста [20, 43]. Структура перекрыта толщей верхнеэоценовых — четвертичных отложений мощностью от 200 до 550 м в ее центральной части. По данным бурения ряда скважин и геофизическим данным установлено сложное строение импактной структуры, содержащей центральный пик, окруженный глубоким внутренним бассейном диаметром около 30 км и мелкой периферической депрессией. Кратер окружен внешним валом диаметром около 80 км. Сейсмические исследования выявили к северо-западу от структуры 23 погребенных вторичных кратера на расстоянии от нескольких до десятков километров от ее внешнего вала. Их диаметры составляют от 0,4 до 4,7 км, глубина — от 50 до 710 м; мощность заполняющих брекчий колеблется в пределах 30—680 м [43].

Импактные породы в кратере представлены брекчией Эксмор, которая состоит из обломков осадочных и кристаллических пород от песчаной до глыбовой и крупноглыбовой размерности. В накоплении брекчии и заполнении кратера большая роль принадлежала смыву с краев воронки и ее склонов рыхлых отложений выбросов возвращенными волнами цунами. Продукты ударного плавления пород представлены редкими мелкими стекловатыми частицами неправильной формы, а также микросферулами [43]. С кратером Чесапик связано образование Североамериканского поля тектитов [30].

**Кратер Мьелнир** (таблица) расположен в Баренцевом море к северу от побережья Норвегии [23]. Кратер образован  $142 \pm 2,6$  млн лет назад в толще глинистых осадков на шельфе Палео-Баренцева моря, глубина в точке удара около 400—600 м. Структура имеет сложное строение с центральным поднятием, окруженным мелкой кольцевой депрессией. Единственная скважина на центральном

поднятии кратера вскрыла брекчированные породы и брекчии осадочных пород [20, 48]. В составе брекчий и зювитов установлена слабая аномалия иридия [55].

**Кратер Нигрунд** (таблица) находится на шельфе Эстонии у входа в Финский залив. Образованный 535 млн лет назад, он наиболее древний из известных подводных кратеров [51]. Импактная структура образована в кристаллическом фундаменте и осадочных отложениях венда и нижнего кембрия, выражена в рельефе дна в виде центральной депрессии диаметром 5,5 км, окруженной тремя концентрическими валами дислоцированных пород основания диаметром соответственно 6,5, 9 и 12 км. Обломки ударнометаморфизованных кристаллических и осадочных пород были установлены в составе маломощной толщи дальних выбросов кратера на расстоянии около 15 км от его центра [52].

**Кратер Кярдла** (таблица) расположен в бассейне Балтийского моря в северной части острова Хиумаа и на прилегающей территории шельфа [6, 21]. Структура образована в кристаллических породах докембрийского фундамента и осадочных отложениях раннепалеозойского возраста. Формирование кратера произошло в мелководном морском бассейне глубиной около 50 м. Установлена хорошая сохранность закратерных выбросов в виде слоя брекчий мощностью от метров до сантиметров, которые непосредственно после отложения были погребены карбонатными осадками верхнеордовикского возраста [20].

Таким образом, все 6 импактных структур, находящихся в настоящее время полностью или частично под уровнем моря, образованы на континентальной коре на шельфе с глубиной от десятков до сотен метров [17—19].

Единственным известным в настоящее время ударным событием, произошедшим в глубоководных океанических условиях, является падение астероида **Элтанин** в юго-восточной части Тихого океана в 1400 км к западу от мыса Горн (рис. 1). Диаметр астероида оценивается равным около 1 км, глубина океана в месте падения составляет 5 км. В точке удара установлено нарушенное залегание пород дна, но кратер не образован. В скважинах, пробуренных в южной части Тихого океана, на площади около 80 000 км<sup>2</sup> вскрыты слои стекловатых пород и мелких обломков астероида, представленного мезосидеритом [32].

Выделившаяся в результате удара энергия была израсходована на испарение водных масс и образование цунами. Возраст ударного события составляет 2,3 млн лет [22]. С падением астероида Элтанин предположительно связываются следы некоторых катастрофических событий в Тихоокеанском бассейне с возрастом 2,2—2,4 млн лет [44].

Условия формирования кратеров в подводных условиях определили особенности их строения и состава комплексов заполняющих отложений и закратерных осадков. Характерные образования подводных импактных структур — мощные толщи заполняющих отложений возвращенных суспензионных потоков в виде слабо сортированных песчаных и мелкообломочных брекчий с включениями обломков и блоков пород мишени, накопление которых происходило на протяжении часов — суток на стадии поздней модификации кратеров [18, 19]. При этом продолжительность отложения заполняющих толщ в подводных импактных структурах, напр., мощностью 185 м в Оболонском кратере и до 500 м в Карском, предположительно исчисляется часами — сутками, в то время как накопление толщ постударных отложений соизмеримой мощности в наземных кратерах занимает миллионы — десятки миллионов лет. В отличие от толщ бал-



листических выбросов, окружающих образованные на суше кратеры, закратерные отложения вокруг подводных структур представлены отложениями цунами и суспензионных потоков. Образование в подводных условиях определяет их быстрое захоронение и полную сохранность под толщами более молодых осадков.

### **Наземные кратеры, образованные в подводных условиях**

Накопленные данные позволили установить образование в подводных условиях ряда импактных структур, в настоящее время расположенных на суше [19, 24]. К настоящему времени на поверхности Земли известна 21 импактная структура, образованная в подводных условиях и выведенная на сушу под действием более поздних тектонических процессов [9, 17, 19, 24]. Большая часть этих структур первоначально не была диагностирована в качестве подводных кратеров.

Большинство этих кратеров расположены в Фенноскандии, в том числе Гарднос диаметром 6 км в Норвегии, Локне диаметром 7,5 км и Тверен диаметром 2 км в Швеции, Лумпарн диаметром 9 км и Кариккоселка диаметром 1,3 км в Финляндии, а также несколько вероятных импактных структур [9, 19]. В Украине к подводным кратерам относится Оболонская структура [4, 24]. На территории России образовавшиеся в подводных условиях кратеры представлены Карской двойной структурой диаметром 65 км на побережье Байдарацкой Губы, Каменской в восточной части Донецкого бассейна диаметром 25 км, Калужской диаметром 15 км и другими. На Североамериканском континенте к ним относятся кратеры Уэтампка диаметром 7,6 км в Алабаме, Авак на Аляске диаметром 12 км и некоторые другие. В Австралии диагностирована единственная импактная структура, образованная в подводных условиях. В пределах Африканского и Южноамериканского континентов образовавшиеся под уровнем моря кратеры до настоящего времени не установлены [17, 19, 21]. Ниже в качестве примера приводится краткая характеристика четырех импактных структур.

**Карская импактная структура** диаметром 65 км расположена на побережье Байдарацкой Губы Карского моря в Европейской части России. Особый интерес к ее изучению вызвали представления о ней как о кратере, с образованием которого связано массовое вымирание органического мира в конце мелового периода [5, 39]. Позднейшие более точные определения абсолютного возраста ударнорасплавленных пород этой структуры позволили опровергнуть эти представления и установить ее образование  $70,3 \pm 2,2$  млн лет назад [54]. Мишень Карской структуры — интенсивно дислоцированный комплекс осадочных пород с возрастом от ордовика до перми. Структура имеет сложное строение с центральным поднятием. Породы импактного комплекса общей мощностью до 1700 м представлены аллогенными брекчиями и зювитами, включающими тела ударнорасплавленных пород. На поверхности этих образований залегает заполняющая толща псаммито-алевритовой брекчии с включениями обломков мишени и стекловидной породы общей мощностью до 500 м. Эти породы свидетельствуют об образовании кратера в подводных условиях при заполнении структуры смывными с вала и краев выбросами и раздробленными породами основания [6, 8].

Образование в подвodomорских условиях определено для **Оболонской импактной структуры**, расположенной на северо-восточном склоне Украинского щита.

Хотя ударное происхождение этой структуры было доказано еще в 1970-х годах [7], ее образование в мелководном морском бассейне было обосновано только в 2007—2009 годах при изучении особенностей заполняющего кратер комплекса пород и окружающей толщи закратерных отложений [4, 24]. Оболонская структура диаметром около 18 км образована в породах кристаллического основания Украинского щита и толще платформенных отложений каменноугольного и триасового возраста общей мощностью около 200—300 м. В кратере на поверхности пород импактного комплекса, представленного брекчиями кристаллических пород и зювитами, залегает толща заполняющего комплекса общей мощностью до 185 м в виде разнотельных песчаных и обломочных брекчий с включениями блоков осадочных пород мишени размером до 15—20 м. Накопление этой толщи происходило в водной среде в результате обратного смыва в кратер нарушенными землетрясением пород мишени, обрушения блоков и глыб пород с вала кратера, а также обратного падения материала, выброшенного по баллистическим траекториям [24]. Разрез заполняющей толщи завершается слоем брекчий кристаллических пород мощностью до 40 м, в которых, кроме остроугольных обломков, в подчиненном количестве имеются окатанные и полуокатанные их разновидности. Условия залегания этого слоя объясняются смывом в кратер материала баллистических выбросов после отложения заполняющего комплекса пород.

Важная особенность химического состава ударнорасплавленных пород из кратера — их обогащение хлором в 5—8 раз сравнительно с кристаллическими породами мишени, что связано с накоплением этого элемента за счет испарения морской воды при ударе [24]. Ранее обогащение хлором было установлено для стекловатых пород, связанных с ударным событием Элтанин в Тихом океане [34].

В скважинах, пробуренных вокруг импактной структуры на расстоянии до 30—35 км от ее центра, закратерные отложения представлены сложно переслаиваемыми слоями брекчий, конгломерато-брекчий и песчаников общей мощностью до 100—120 м, образованных цунами, отложениями суспензионных потоков и баллистическими выбросами. Отложения заполняющего комплекса внутри структуры и закратерные отложения за ее пределами перекрыты морскими осадками байосского и батского возраста, что свидетельствует об ее образовании в среднеюрское время и согласуется с определениями абсолютного возраста ударнорасплавленных пород, равного  $169 \pm 7$  млн лет [1, 24].

**Каменная импактная структура** диаметром 24 км расположена в восточной части Донецкого бассейна на территории России. Кратер образован в толще каменноугольных пород и перекрывающих отложений триасового и верхнемелового возраста. Импактная структура имеет сложное строение с центральным поднятием высотой около 450 м [3]. Заполняющий комплекс представлен глубоководной свитой, состоящей из песчано-мергелистых отложений с включениями обломков и гальки пород мишени. Условия накопления свиты и ее строение служат доказательствами образования кратера в мелководном морском бассейне [6, 19]. Возраст кратера равен  $49,0 \pm 0,2$  млн лет [21].

**Импактная структура Уэтампа** диаметром 7,6 км в юго-восточной части США — один из кратеров, образованных в подводных условиях и выведенных на поверхность суши [28, 29]. Кратер образован в результате астероидного удара в мелководный морской бассейн в поздне меловое время. Мишень структуры представлена кристаллическими породами фундамента и осадочными образова-

ниями верхнемелового возраста. Вскрытый скважинами разрез верхней части заполняющего комплекса представлен песчаными и обломочными брекчиями с включениями блоков осадочных и кристаллических пород мишени размером до 10 м. По данным работы [28], эти отложения накопились на ранней стадии модификации кратера в результате обрушения его вала и стенок, обратного падения баллистических выбросов и привноса материала возвращенными водными потоками. Важно отметить большое сходство строения и состава заполняющих комплексов Оболонской структуры на Украинском щите и кратера Уэтампка.

Все известные в настоящее время импактные структуры, образовавшиеся в подводных условиях, имеют фанерозойский возраст. Наиболее древняя — структура Гарднос в Норвегии, возраст которой 546 млн лет. Наиболее молодой — кратер Чесапик в США, образованный 35,5 млн лет назад [21].

Следами наиболее древнего ударного события (или событий) на земной поверхности служат слои микросферул в архейской формации Барбертон в Южной Африке возрастом 3,4 млрд лет, а также слои микросферул в архейских отложениях Австралии. Мощность слоев в африканских разрезах достигает 4 м. О связи их образования с грандиозными ударными событиями свидетельствует состав микросферул, в том числе высокое содержание иридия и некоторых сидерофильных элементов, которое во многих образцах выше, чем в метеоритах [33], а также изотопный состав хрома [47] и другие особенности. По предварительной оценке, образование слоев микросферул стало следствием падения в океанический бассейн астероида диаметром 20—50 км [33].

## **Заключение**

Число достоверных импактных структур на поверхности Земли каждый год увеличивается на несколько новых, ранее не известных кратеров. Так, за 2004—2015 гг. их список пополнился на 18 структур [21]. Продолжающееся в течение последних десятилетий постоянное увеличение числа импактных структур свидетельствует о значительных резервах еще не известных объектов ударного происхождения. Наряду с регионами с высокой концентрацией импактных структур, такими, как Канадский щит, Восточноевропейская платформа с Балтийским и Украинским щитами и Австралийский континент, за их пределами на огромных пространствах суши до последнего времени диагностированы только единичные кратеры. К таким регионам относятся Азия, Африка и Южная Америка. Распространение единичных кратеров на этих территориях связано, в первую очередь, с их недостаточной изученностью, а также труднодоступностью и условиями обнаженности некоторых регионов. Например, на огромной территории КНР первая достоверная импактная структура Ксиюань диаметром 1,8 км была описана только в 2004 году [21].

Образовавшиеся в подводных условиях импактные структуры составляют около 14 % от их общего числа на земной поверхности. Один из резервов для открытия новых импактных структур, кроме недостаточно исследованных территорий Азии, Африки и Южной Америки, — дно морей и океанов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуров Е.П., Гожик П.Ф. Импактное кратерообразование в истории Земли. — К., 2006. — 217 с.
2. Гуров Е.П., Гожик П.Ф. Образование кратера Чиксулуб и мел-палеогеновое массовое вымирание // Геол. журн. — 2005. — № 1. — С. 39—49.
3. Гуров Е.П., Гурова Е.П. Геологическое строение и вещественный состав пород импактных структур. — К. : Наук. думка, 1991. — 160 с.
4. Гуров Е.П., Гурова Е.П., Ямниченко А.Ю., Черненко Ю.А. Заполняющий комплекс и закратерные отложения Оболонской импактной структуры // Геол. журн. — 2007. — № 4. — С. 48—59.
5. Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя / Ред. В.Л. Масайтис. — Л. : Наука, 1990. — 185 с.
6. Масайтис В.Л., Данилин А.Н., Мащак М.С. и др. Геология астроблем. — Л. : Недра, 1980. — 231 с.
7. Масайтис В.Л., Данилин А.Н., Карнов Г.М., Райхлин А.И. Карлинская, Оболонская, Ротм-стровская астроблемы в Европейской части СССР // Докл. АН СССР. — 1976. — **230**, № 1. — С. 174—177.
8. Мащак М.С. Морфология и структура Карской и Усть-Карской астроблем // Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя / Ред. В.Л. Масайтис. — Л. : Наука, 1990. — С. 37—55 с.
9. Abelis A., Plado J., Pesonen L.J., Lehtinen M. The impact cratering record of Fennoscandia — a close look at the database // Impacts in Precambrian shields / Eds. J. Plado, L.J. Pesonen. — Berlin : Springer, 2002. — P. 1—58.
10. Adatte T., Keller G., Burns S. et al. Paleoenvironment across the Cretaceous-Tertiary transition in eastern Bulgaria // Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impacts and Beyond / Eds. C. Koeberl, K.G. MacLeod. — Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. — 2002. — **356**. — P. 231—251.
11. Alvarez L.W., Alvarez W., Asaro F., Michel H.V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction // Science. — 1980. — **208**. — P. 1095—1108.
12. Barton R., Bird K., Hernández J.G. et al. High-impact reservoirs. Oilfield Review. — Winter 2009/2010. — **21**, № 4. — P. 14—29.
13. Belcher C.M. Impacts and wildfires — an analysis of the K-T event // Biological processes associated with impact events / Eds. C. Cockell, C. Koeberl, I. Gilmour. — Berlin : Springer, 2006. — P. 221—243.
14. Bourgeois J., Hansen T.A., Wiberg P.L., Kauffman E.G. A tsunami deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in Texas // Science. — 1988. — **241**. — P. 567—570.
15. Claeys P., Kiessling W., Alvarez W. Distribution of Chicxulub ejecta at the Cretaceous-Tertiary boundary // Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impacts and Beyond / Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. — 2002. — **356**. — P. 55—68.
16. Donofrio R.R. Survey of hydrocarbon-producing impact structures in North America: exploration results to date and potential for discovery in Precambrian basement rocks // Ames Structure in Northwest Oklahoma and Similar Features: Origin and Petroleum Production. — Oklahoma : The University of Oklahoma Press, 1997. — P. 17—29.
17. Dypvik H. Marine impacts and their consequences. — Encyclopedia of marine geosciences. — Springer Science+Business Media Dordrecht, 2015. — DOI 10.1007/978-94-007-6644-0\_69-4. — P. 1—10.
18. Dypvik H., Burchell M.J., Claeys P. Impacts in marine and icy environments — a short revive // Cratering in marine environments and on ice / Eds. H. Dypvik, M. Burchell, P. Claeys. — Berlin : Springer, 2004. — P. 1—21.
19. Dypvik H., Jansa L.F. Sedimentary signatures and processes during marine bolide impacts: a review // Sedimentary Geology. — 2003. — **161**. — P. 309—317.
20. Dypvik H., Kalleson E. Mechanisms of late synimpact to early postimpact crater sedimentation in marine-target impact structures // Large meteorite impacts and planetary evolution III / Eds. R.L. Gibson, W.U. Reimold. — Geol. Soc. Amer. Spec. Paper, 2010. — **465**. — P. 301—318.
21. Earth Impact Database. [Электрон. ресурс]. — Режим доступа : [www.passc.net/](http://www.passc.net/) EarthImpact-Database. — 2015.
22. Gersonde R., KYTE F.T., Bleil U. et al. Geological record and reconstruction of the Late Pliocene impact of the Eltanin asteroid in the Southern Ocean // Nature. — 1997. — **390**. — P. 357—363.

23. *Gudlaugsson S.T.* Large impact crater in the Barents Sea // *Geology*. — 1993. — **21**. — P. 291—294.
24. *Gurov E., Gurova E., Chernenko Y., Yamnichenko A.* The Obolon impact structure, Ukraine, and its ejecta deposits // *Meteoritics & Planetary Sciences*. — 2009. — **44**, № 3. — P. 389—404.
25. *Hildebrand A.R., Penfold G.T., Kring D.A. et al.* Chicxulub crater: A possible Cretaceous-Tertiary Boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico // *Geology*. — 1991. — **19**. — P. 867—871.
26. *Hildebrand A.R., Pilkington M., Ortiz-Aleman C. et al.* Mapping Chicxulub crater structure with gravity and seismic reflection data // *Meteorites: Flux with Time and Impact Effects* / Eds. M.M. Grady, R. Hutchison, G.J. McCall, D.A. Rothery; Geological Society. — London : Special Publications, 1998. — **140**. — P. 155—176.
27. *Jourdan F., Reimold W.U., Deutsch A.* Dating Terrestrial impact structures // *Elements*. — 2012. — **8**. — P. 49—53.
28. *King Jr. D. T., Thornton L., Petruny N., Petruny L.W.* Structure-filling sediments of the Wetumpka marine-target impact structure // *Cratering in marine environments and on ice* / Eds. H. Dupvik, M. Burchell, P. Claeys. — Berlin : Springer, 2004. — P. 97—113.
29. *King Jr. D.T., Neathery T.L., Petruny L.W. et al.* Shallow marine-impact origin for the Wetumpka structure (Alabama, USA) // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2002. — **202**. — P. 541—549.
30. *Koeberl C., Poag C.W., Reimold W.U., Brandt D.* Impact origin of the Chesapeake Bay structure and the source of the North American tektites // *Science*. — 1996. — **271**. — P. 1263—1266.
31. *Kyte F.T.* A meteorite from the Cretaceous. — Tertiary boundary // *Nature*. — 1998. — **396**. — P. 237—239.
32. *Kyte F.T.* Composition of impact melt debris from the Eltanin impact strewn field, Bellinghausen Sea // *Deep-sea research II*. — 2002. — **49**. — P. 1029—1047.
33. *Love D.R., Byerly G.R., Asaro F., Kyte F.J.* Geological and geochemical record of 3400-million-year-old Terrestrial meteorite impact // *Science*. — 1989. — **245**. — P. 959—962.
34. *Margolis S.V., Claeys P., Kyte F.T.* Microtektites, microcrystites and spinels from a late Pliocene asteroid impact in the Southern Ocean // *Science*. — 1991. — **251**. — P. 1594—1597.
35. *Matsui T., Imamura F., Tajika E. et al.* Generation and propagation of a tsunami from the Cretaceous-Tertiary impact event // *Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impacts and Beyond*. — Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. — 2002. — **356**. — P. 69—77.
36. *Montanari A., Koeberl C.* Impact stratigraphy. The Italian record // *Lecture notes in Earth Sciences*. — Berlin : Springer, 2000. — **93**. — 454 p.
37. *Morgan J., Warner M., Brittan J. et al.* Size and morphology of the Chicxulub impact crater // *Nature*. — 1999. — **390**. — P. 472—476.
38. *Morgan J., Warner M., Grieve R.A.F.* Geophysical constrains on the size and structure of the Chicxulub impact crater // *Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impact and Beyond*. — Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. — 2002. — **356**. — P. 39—46.
39. *Nazarov M.A., Badjukov D.D., Alekseev A.S.* The Kara structure as a possible K/T impact site // *Lunar and Planetary Science Conference XXIII (abstracts)*. — 1992. — P. 969—970.
40. *Norris R.D., Firth J.V.* Mass wasting of Atlantic continental margins following the Chicxulub impact event // *Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impact and Beyond*. — Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. — 2002. — **356**. — P. 79—95.
41. *Ocampo C., Pope K.O., Fischer A.G.* Ejecta Blanket Deposits of the Chicxulub Crater from Albion Island, Belize // *The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History* / Eds. G. Ryder, D. Fastovsky, S. Gartner. — Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. — 1996. — **307**. — P. 75—88.
42. *Ormö J., Lindström M.* When a cosmic impact strikes the sea bed // *Geological Magazine*. — 2000. — **137**. — P. 67—80.
43. *Poag C.W., Koeberl C., Reimold U.W.* The Chesapeake Bay crater impact. — Berlin : Springer, 2004. — 522 p.
44. *Rampino M.R., Haggerty B.M.* Impact crises and mass extinctions: A working hypothesis // *The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History*. — Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. — 1996. — **307**. — P. 11—30.
45. *Schulte P. and 40 co-authors.* The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary // *Science*. — 2010. — **327**. — P. 1214—1218.
46. *Sharpton V.L., Marin L.E., Carney J.L. et al.* A model of the Chicxulub impact basin based on evaluation of geophysical data, well logs, and drill core samples // *The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History*. — Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. — 1996. — **307**. — P. 55—74.



47. *Shukolukov A., Kyte F. T., Lugmair G.W.* The oldest impact deposits on Earth — first confirmation of an Extraterrestrial component // *Impacts and the early Earth* / Eds. I. Gilmour, C. Koeberl. — Lecture notes in Earth sciences. — Berlin : Springer, 2000. — **91**. — P. 99—116.
48. *Shuvalov V., Dypvik H.* Ejecta formation and crater development of the Mjolnir impact // *Meteoritics and Planetary Sciences*. — 2004. — **39**. — P. 467—479.
49. *Smit J.* The global stratigraphy of the Cretaceous-Tertiary boundary impact ejecta // *Annual Review Earth and Planetary Sciences*. — 1999. — **27**. — P. 75—113.
50. *Smit J., Roep T.B., Alvarez W. et al.* Coarse-grained clastic sandstone complex at the K/T boundary around the Gulf of Mexico: Deposition by tsunami waves induced by the Chicxulub impact? // *The Cretaceous-Tertiary Event and other Catastrophes in Earth History*. — Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. — 1996. — **307**. — P. 151—182.
51. *Suuroja S., Suuroja K.* The Neugrund marine impact structure (Gulf of Finland, Estonia) // *Cratering in marine environments and on ice* / Eds. H. Dypvik, M. Burchell, P. Claeys. — Berlin : Springer. — 2004. — P. 75—95.
52. *Suuroja K., Suuroja S.* The Neugrund meteorite crater on the seafloor of the Gulf of Finland, Estinia // *BALTICA*. — 2010. — **23**, № 1. — P. 47—58.
53. *Toon O.B., Zahnle K., Morrison D. et al.* Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets // *Reviews of Geophysics*. — 1997. — **35**, № 1. — P. 41—78.
54. *Trieloff M., Deutsch A.* The age of the Kara impact structure? Russia // *Meteoritics & Planetary Sciences*. — 1988. — **33**. — P. 361—372.
55. *Tsikalas F., Faleide J.I.* Near-field erosional features at the Mjolnir impact crater // *Cratering in marine environments and on ice* / Eds. H. Dypvik, M. Burchell, P. Claeys. — Berlin : Springer. — 2004. — P. 39—55.

Статья поступила 02.02.2016

Е.П. Гуров

## ІМПАКТНІ СТРУКТУРИ МОРІВ ТА ОКЕАНІВ

На поверхні Землі на сьогодні встановлено 188 імпактних структур, кількість яких постійно збільшується. З цього числа шість кратерів утворені у морських умовах і повністю або частково розташовані під поверхнею води. Крім того, з загальної кількості імпактних структур, зафіксованих на континентах, для 21 структури встановлено утворення у підводних умовах з подальшим виведенням на суходіл у ході тектонічних процесів. Хоча океани і моря вкривають 71 % поверхні Землі, тільки для 14 % імпактних структур доведено утворення у морських умовах. Це пояснюється молодим віком океанічного дна, поглинанням кінетичної енергії ударників товщею води, а також труднощами пошуків та відкриття підводних імпактних структур.

**Ключові слова:** імпактна структура, астероїд, цунамі, суспензійний потік, брекчія.

Ye.P. Gurov

## IMPACT STRUCTURES IN SEAS AND OCEANS

Recently 188 impact structures were discovered on the Earth surface, and their number continuously increased. 6 craters were formed in marine conditions, and now they are completely or partially occur under the sea surface. The underwater origin and the later removal to the land surface by tectonic processes was determined for 21 craters from the whole number of the continental impact structures. While oceans cover about 71 % of the Earth, the underwater origin was determined for 14 % of impact craters only. Such low number of underwater craters is due to the young age of the ocean floor and absorption of impact energy of the asteroids by the water column, as well as the difficulty of discovery of underwater craters.

**Key words:** impact structure, asteroid, tsunami, suspension flow, breccia.