

© С.А. Вишнеvский¹, д.чл. УАГН В.Ф. Коробков²

КУПОЛ ШИЙЛИ В ЗАПАДНОМ ПРИМУГОДЖАРЬЕ: ЭОЦЕНОВАЯ МОРСКАЯ ИМПАКТНАЯ СТРУКТУРА

¹ *Институт Минералогии и Петрографии СО РАН, г. Новосибирск, 630090,
пр. Коптюга 3. E-mail: nadezhda@uiggm.nsc.ru*

² *ОАО "Актюбинский научно-исследовательский геологоразведочный
нефтяной институт" (ОАО "АктюбНИИГРИ"), Казахстан, г. Актюбе, 463002,
ул. Мирзояна 17. E-mail: "geolog" <geolog@nursat.kz>*

(Представлена д. чл. УАГН В.В. Юришем)

© Vishnevsky S.A., Korobkov V.F.

THE SHIYLI DOME, WESTERN CIS-MUGOJARANS: MARINE IMPACT SITE OF EOCENE AGE

Автореферат

Купол Шийли в Западном Примугоджарье является центральным поднятием эродированной морской импактной структуры в рыхлых мезо-кайнозойских отложениях. Он имеет диаметр 1,2 км и окружен кольцевой просадкой прилегающих пород. В породах структуры обнаружены макроскопические (ударный кливаж, брекчии «грис», ударные конусы и ударные зеркала скольжения) и микроскопические (планарные структуры в кварце) признаки слабого ударного метаморфизма. Реконструкция процесса образования астроблемы показывает, что импактное событие Шийли произошло в неглубоком, ~350 м, эоценовом морском бассейне и по своему энергетическому эквиваленту соответствовало кратеру диаметром ~3,2 км. Центральное поднятие астроблемы возникло в результате упругой отдачи пород мишени. В условиях водного покрова импактный кратер Шийли был очень мелким, ~50 м глубиной, или отсутствовал; возможно, в последнем случае вокруг ядра структуры, включающего центральное поднятие и кольцевую просадку пород мишени, произошло только центробежное растекание придонных осадков.

Abstract

The Shiyli Dome in Western Cis-Mugojarians is a central uplift of eroded marine impact structure originated in loose Mesozoic+Cenozoic sediments. It is of 1.2 km in diameter and is surrounded by a ring subsidence of enclosing rocks. A number of evidences of weak shock metamorphism both macroscopic (shock cleavage, "gries" breccia, shatter cones and shock slickensides) and microscopic

(PDFs in quartz) are found in the rocks of the structure. Reconstruction of origin processes shows that the Shiyli impact event occurred in shallow, ~350 m deep, Eocene Sea with energy resembling crater of ~3.2 km in diameter. The central uplift of the structure originated as a result of elastic response of the target. Due to water-protecting effect, the Shiyli impact crater was either very shallow, ~50 m deep, or was absent at all. In the last case, centrifugal displacement of the bottom sediments took possibly place around the core (uplift+ring syncline in the target rocks) of the structure.

Введение

Купол Шийли, с координатами центра 49°10' с.ш. и 57°51' в.д., расположен в 130 км юго-восточнее Актюбинска (рис. 1), в долине р. Шийли, от которой структура получила своё название. В 1951-54 г.г., в предположении, что купол может быть вероятным нефте-газоносным соляным диапиром, на структуре были проведены детальные буровые исследования. Они показали, что пермские соленосные толщи выклиниваются западнее структуры, а купол подстилается ниже-каменноугольными терригенными отложениями палеозойского фундамента и представляет бескорневую структуру, которая выражена только в породах мезо-кайнозойского осадочного чехла. С тех пор структура оставалась необъяснимым феноменом. В предположении, что купол Шийли может являться импактной структурой, мы провели соответствующие исследования, которые подтвердили нашу гипотезу [4]. Последние результаты этих исследований сообщаются ниже.

Породы мишени и перекрывающего комплекса; геологическая история региона

Мишень астроблемы Шийли (рис. 2) имеет двучленное строение и представлена дислоцированными палеозойскими породами фундамента, которые перекрыты осадочным чехлом горизонтально залегающих мезо-кайнозойских формаций.

Палеозойский фундамент сложен однообразными девонскими и каменноугольными (включая верхний карбон) сероцветными породами Изембетской толщи (переслаивающиеся песчаники, алевролиты, аргиллиты и гравелиты, с подчинённым количеством известняков и конгломератов) суммарной мощно-

стью >2100 м. Эти породы интенсивно смяты в серию антиклинальных и синклиналиных складок субмеридионального направления. Лишь в 5-7 км к западу от купола Шийли в разрезе пород фундамента появляются соленосные пермо-триасовые отложения, которые налегают с резким угловым несогласием на Изембетскую толщу. Таким образом, в образовании купола соляная тектоника исключена. В домеловое время поверхность фундамента была пенепленизирована и в настоящее время, по данным бурения и сеймики, представляет погребённую полого-наклонную на запад равнину с высотными отметками от +100 до +140 м над уровнем моря.

Осадочный чехол, залегающий на выровненной поверхности палеозойского фундамента, сложен меловыми и палеогеновыми породами. Разрез меловых пород включает, снизу вверх: 1) отложения готеривского яруса – светло-окрашенные плотные глины с редкими прослоями тонкозернистых песчаников, мощностью 20-30 м; 2) морские отложения аптского яруса – тёмно-окрашенные глины с прослоями песка, алевролитов и песчаников, мощностью до 40 м; 3) отложения альбского яруса – тёмно-окрашенные глины с прослоями песка + серые и белые разнозернистые пески + жёлтые охристые пески и песчаники мощностью до 75 м. Далее фиксируется стадия континентального развития, и разрез меловых пород с размывом наращивается следующими породами: 4) морские отложения сантонского яруса – глауконитовые пески, песчаники и глины мощностью до 15-20 м; в основании, средней части разреза и в кровле этих отложений содержатся горизонты фосфоритовых желваков; 5) морские отложения кампанского яруса – зеленовато-серые гипсоносные глины мощностью до 25-30 м; 6) морские карбонатные отложения маастрихтского яруса – голубовато-серые мергелистые глины мощностью до 10 м, которые сохранились в районе фрагментарно. Разрез палеогеновых пород, с размывом налегающих на меловые отложения, включает, снизу вверх: 1) мелководные отложения Тыкбутацкой свиты палеоцен-нижне-эоценового возраста, мощностью до 30-40 м, сложенные плотными кремнистыми глинами, опоками и глауконитовыми песчаниками; 2) более глубоководные морские отложения Акчатской свиты нижне-средне-эоценового возраста, мощностью до 30 м, сложенные трепеловидными глинами.



Рис. 1. Географическое расположение купола Шийли (указан стрелкой).

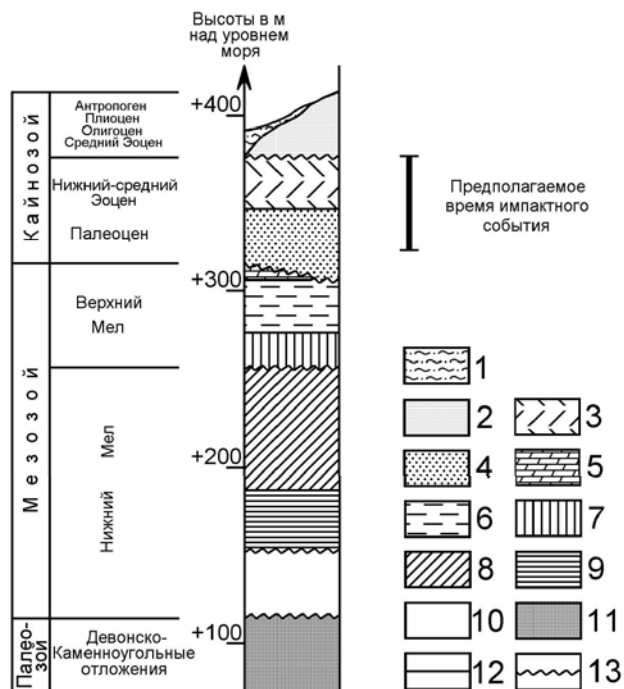


Рис. 2. Региональная стратиграфия и предполагаемое время импактного события.

Легенда: 1 – четвертичные, ранне-четвертичные, плиоценовые и олигоценовые отложения; 2 – континентальные отложения Казацкой свиты среднего эоцена; 3 – морские отложения Акчатской свиты среднего эоцена; 4 – морские отложения Тыкбутакской свиты (палеоцен-нижний эоцен); 5 – морские отложения маастрихтского яруса; 6 – морские отложения кампанского яруса; 7 – морские отложения сантонского яруса; 8 – отложения альбского яруса; 9 – морские отложения аптского яруса; 10 – отложения готеривского яруса; 11 – палеозойские породы фундамента (Изембетская толща); 12 – согласное напластование пород в непрерывных геологических разрезах; 13 – перемены в осадконакоплении.

Постимпактные (см. ниже) отложения осадочного чехла включают: 1) континентальные породы Казацкой свиты средне-эоценового возраста, представленные песками, крепкими песчаниками и глинами, которые сохранились фрагментарно на наиболее возвышенных участках рельефа, где бронируют вершины столовых гор; в наиболее полных разрезах мощность свиты достигает 36 м, а в районе астроблемы она неизвестна; 2) фрагментарно сохранившиеся покровы олигоценовых ожелезненных песков и песчаников мощностью до 1-4 м; 3) шлейфы и покровы нерасчлененных плиоцен-нижнечетвертичных глин и суглинков, мощностью от 1 до 15 м; 4) маломощные покровы делювиальных, аллювиальных и эоловых четвертичных отложений.

Кайнозойская история региона представляется следующим образом. С уходом моря в конце маастрихтского времени здесь начался период континентального развития, который занимал весь датский век, а, возможно, и более позднее время. Затем началась палеогеновая трансгрессия, и в поздне-палеоценовое время море распространилось на всю территорию региона. На дне обширного мелководного морского бассейна началось отложение кремнистых осадков Тыкбутакской свиты. В конце нижне-эоценового времени произошло углубление морского бассейна, и в нём начали отлагаться осадки Акчатской свиты, богатые диатомовыми и кремниевыми скелетами водорослей. В конце эоценового времени море быстро отступило, и в регионе начался период континентального развития, который продолжается до сих пор. В течение этого периода накапливались эоловые отложения Казацкой свиты и более молодые отложений. Вследствие активной денудации, которая продолжается и сегодня, палеогеновые отложения были существенно эродированы, вплоть до полного уничтожения. Однако, спокойное субгоризонтальное залегание пород осадочного чехла позволяет оценить мощность уничтоженной части разреза. По останкам пород Казацкой свиты на отдельных вершинах (г. Музбель, +328 м; холмы Уркач, +428 м), кровля размытой части разреза палеогеновых отложений оценивается гипсометрическими отметками порядка от +340 до +440 м над уровнем моря.

Морфология купола Шийли и его выражение в физических полях

Купол Шийли отпрепарирован эрозией и хорошо выражен в рельефе, образуя округлый холм с высотными отметками +317-318 м, который уступообразно, с крутизной склонов ~10-12°, возвышается над окружающей равниной на 20-25 м. Однако, восточный сектор купола нечётко выделяется в топографии и плавно переходит в пологий водораздел. Вершина купола почти плоская, но имеет блюдцеобразную западину в центре, глубиной 3-5 м. Диаметр вершины холма Шийли по гребню этой западины составляет 400-425 м, а диаметр его подножия – 750-800 м. Русла временных потоков образуют радиально-кольцевую систему вокруг купола. Примерно в 1 км к югу от центра структуры расположена гряда небольших холмов с относительно высокими высотами ~10-12 м, которая как бы огибает купол, а затем сливается с водораздельным плато на востоке. В физических полях – гравитационном и магнитном – купол Шийли совершенно не выражен (рис. 3, 4). Это связано с тем, что

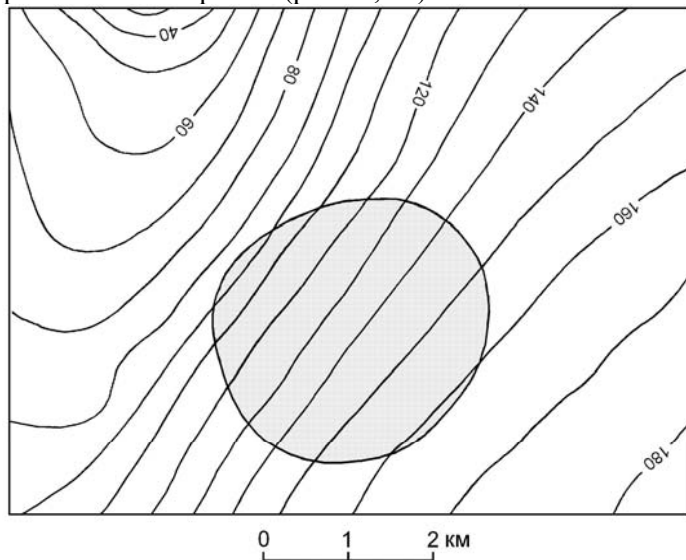


Рис. 3. Купол Шийли (затушёван) в аномальном магнитном поле ΔT_a (цифры на изолиниях указывают интенсивность поля в нанотеслах).

структура купола не имеет своего продолжения в породах фундамента, а отложения осадочного чехла довольно монотонны по своим магнитным и плотностным особенностям. Отсутствие аномалий в физических полях представляет специфику купола, которая должна учитываться при поисках других подобных структур на осадочной мишени.

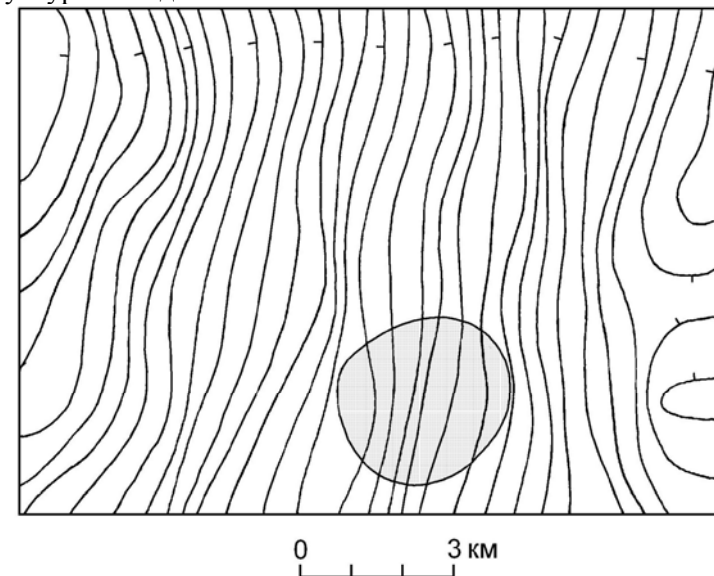


Рис. 4. Купол Шийли (затушёван) в наблюдаемом поле силы тяжести (изолинии поля проведены через 0.5 мгал).

Геология купола Шийли

Купол Шийли представляет контрастную диапироподобную структуру на фоне горизонтально залегающих толщ осадочного чехла. Поскольку вариант соляного диапира или иной структуры, связанной с движением пород фундамента, отпадает, этот купол представляет бескорневую структуру и выглядит необъяснимым парадоксом с точки зрения региональной геологии.

В ядре купола (рис. 5, 6) обнажены породы альбского яруса, на которые периклинально налегают отложения сантонского яруса; отпрепарированные эрозией горизонты фосфоритов и 10

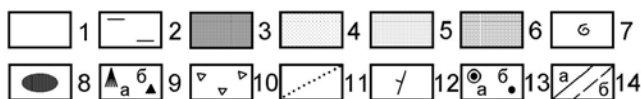
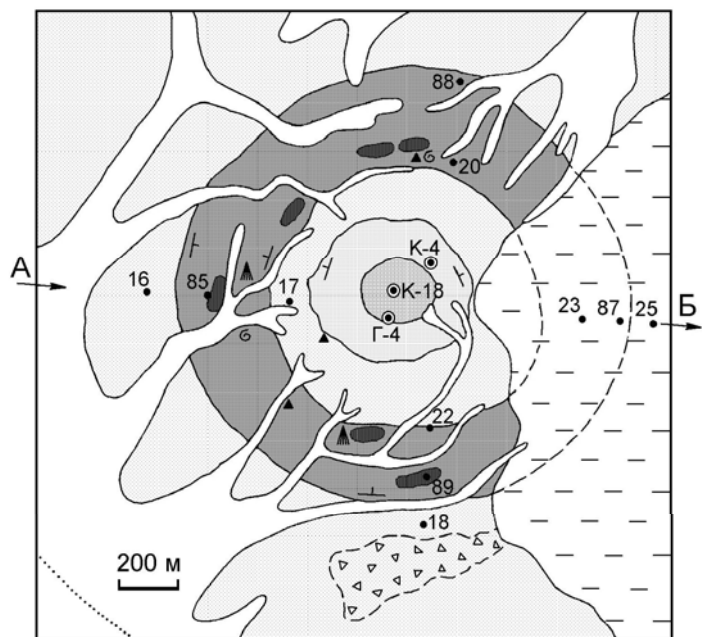


Рис. 5. Геологическая карта купола Шийли (стрелками А и Б показана линия разреза, приведённого на рис. 6)

Легенда. Перекрывающий комплекс: 1 – делювиальные, элювиальные и аллювиальные четвертичные отложения; 2 – плиоцен-нижнечетвертичные отложения. **Комплекс пород мишени:** 3 – палеоцен-нижнеэоценовые породы Тыкбутацкой свиты; 4 – породы кампанского яруса; 5 – породы сантонского яруса; 6 – породы альбского яруса. **Прочие обозначения:** 7 – находки фауны; 8 – участки интенсивного дробления палеогеновых пород с проявлениями ударного кливажа и брекчий «грис»; 9 – находки ударных конусов (а) и пород с планарными микродеформациями в кварце (б); 10 – зона дислоцированных пород кампанского яруса; 11 – предполагаемая граница импактных дислокаций в породах мишени; 12 – элементы залегания пород; 13 – скважины, вскрывшие палеозойский фундамент (а) и мелкие картировочные скважины (б); 14 – достоверные (а) и предполагаемые (б) границы геологических тел.

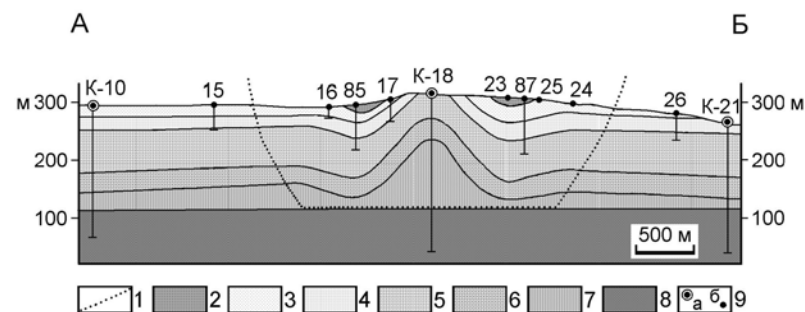


Рис. 6. Геологический разрез через купол Шийли по линии А-Б (см. рис. 5).

Легенда: 1 – предполагаемая граница импактных дислокаций в породах мишени; 2 – породы Тыкбутацкой свиты; 3 – породы кампанского яруса; 4 – породы сантонского яруса; 5 – породы альбского яруса; 6 – породы аптского яруса; 7 – породы готеривского яруса; 8 – породы палеозойского фундамента; 9 – глубокие (а) и мелкие (б) буровые скважины (см. рис. 5).

песчаников в составе этих отложений гребнеобразно выражены в морфоструктуре купола. Далее кольцевая структура купола продолжается породами кампанского яруса, которые широко распространены и в обрамлении объекта. Впечатляющим элементом структуры купола является окружающая его кольцевая синклиналь с осевым диаметром 1200 м, выполненная палеогеновыми породами Тыкбутацкой свиты. Их мощность на оси жёлоба достигает 15-20 м. Благодаря наличию в составе свиты крепких светло-окрашенных опок и песчаников, палеогеновые породы кольцевой синклинали выражены в рельефе системой невысоких концентрических гряд и хорошо выделяются на аэрофотоснимках. По результатам бурения, кольцевая просадка палеогеновых и других подстилающих пород чехла образовалась в результате сокращения мощности глин готеривского яруса; при этом, сокращение их мощности под кольцевой просадкой компенсировалось резким, до 120 м, возрастанием мощности этих глин в центре купола (рис. 6). Таким образом, вся структура купола возникла в результате центростремительного течения пород к его оси; отток вещества к центру и вверх вызвал образование диапира и кольцевой просадки вокруг него.

По данным бурения, углы падения слоёв в зоне диапира составляют от 25° до 60°, а некоторые фрагменты разреза залегают даже вертикально.

Особенности геологического строения и бескорневой характер купола Шийли позволяют рассматривать его как центральное поднятие эродированной астроблемы. Мелкие редкие обломки палеогеновых опок и кварцитопесчаников в делювии на вершине холма Шийли могут указывать на наличие внедрённых даек брекчированного материала в породах купола. Упомянутая выше гряда холмов к югу от купола, сложенная породами кампанского яруса, несёт следы глыбово-блокового строения. Возможно, что здесь сохранились реликты системы центробежных надвигов или кольцевых разломов, которые были развиты по периферии астроблемы.

Признаки ударного метаморфизма

Следы ударного метаморфизма обнаружены только в таких механически-крепких породах мишени как песчаники и кварцитопесчаники и сосредоточены, главным образом, в палеогеновых породах кольцевой синклинали (рис. 5). Их присутствие подтверждает импактное происхождение купола Шийли.

Макроскопические признаки ударного метаморфизма представлены ударным кливажом, брекчиями «грис», конусами разрушения и ударными зеркалами скольжения.

Ударный кливаж наблюдается в кварцитопесчаниках и выражается в том, что эта крепкая сливная порода приобретает пластинчатую отдельность благодаря сериям субпараллельных трещин различной густоты. Эти трещины притёртые или открыто-зияющие, но порода вовсе не представляет хрупкого, крошащегося агрегата обломков и обладает большой механической прочностью: описываемая отдельность выявляется только посредством молотка. Трещиноватость подобного рода известна в крепких породах из пунктов ядерных взрывов (трахибазальты полигона Невада, США [23]) и из различных астроблем (долериты Логанчинского кратера [1]; кварцевые массы в Чукчинском кратере [3]). Поскольку в астроблеме Шийли обнаружены достоверные признаки ударного метаморфизма, а вне её породы осадочного чехла не подвергались дислокациям, то описываемый

мый кливаж имеет несомненное импактное происхождение.

Брекчии «грис» (рис. 7) развиты по кварцитопесчаникам и представляют мономиктные агрегаты обломков дресвянощепневой размерности, которые притёрты друг к другу и цементируются спрессованной горной мукой. Как и кливажированные разности, весь агрегат в целом является плотной и крепкой породой. В отдельных крупных (3-5 см) обломках из этих брекчий содержатся трещины ударного кливажа, описанного выше. Брекчии «грис» и ударный кливаж приурочены к нескольким очагам интенсивного дробления в палеогеновых породах вокруг купола (рис. 5).

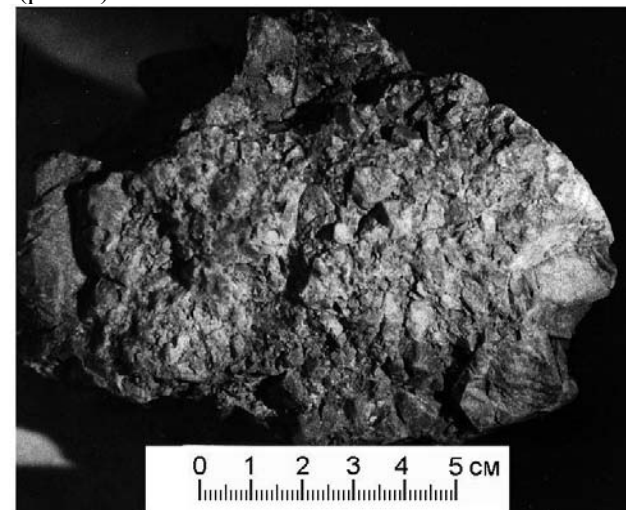


Рис. 7. Брекчия «грис» в кварцито-песчаниках Тыкбутацкой свиты, обр. № 3.

Конусы разрушения обнаружены в пределах кольца палеогеновых пород вблизи очагов интенсивного дробления (рис. 5). Они представляют отколы с характерной ёльчатой системой ветвящихся под углом 16-22° бороздок (рис. 8). Полных конусов не обнаружено, и описываемые отколы представляют системы слабо выпуклых конических сегментов. В других, кроме кварцитопесчаников, палеогеновых породах конусы не найдены. Возможно, что «зеркала скольжения», наблюдавшиеся в 1951-54 г.г. в керне пород из центральной части купола, также являются конусами разрушения.

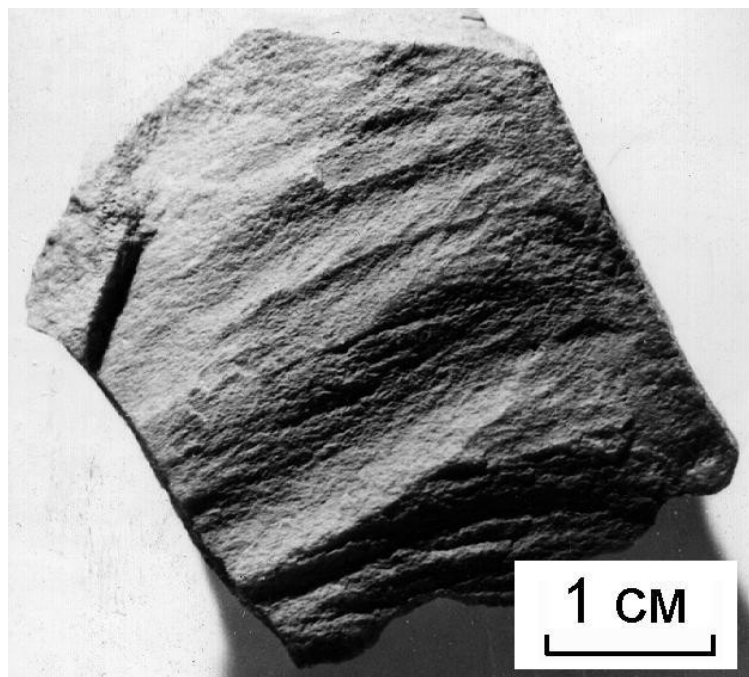


Рис. 8. Фрагмент откольной поверхности породы с ударными конусами: наблюдаются ветвящиеся бороздки. Кварцитопесчаники Тыкбутакской свиты, обр. № 30.

Ударные зеркала скольжения. Под этим названием мы описываем микро-зеркала скольжения с системами тонких параллельных бороздок (рис. 9), которые присутствуют в ударнокливажированных песчаниках южного сектора астроблемы. Они образуют лентовидные полосы шириной до 0,5-1 см и протяжённостью до 5-10 см, причём смещение, судя по штриховке, происходило вкрест протяжения полос. По чистоте поверхности и тонкости штриховки данные зеркала напоминают следы тектонического скольжения в очень пластичных породах. Однако, для такой крепкой и одновременно хрупкой породы как кварцитопесчаник они являются парадоксальными, если их считать обычными тектоническими деформациями. Как и в случае ударного кливажа, описанного выше, нет никаких оснований считать, что в спокойно залегающих породах осадочного чехла

эти деформации могли образоваться иным, нежели импактный, способом. Поэтому мы считаем, что образование таких зеркал в породах астроблемы происходило в режиме пластической деформации при сильном импульсном сжатии, то-есть, они являются не только сопутствующим признаком, но и новым макроскопическим критерием слабого ударного метаморфизма – ударными зеркалами скольжения.

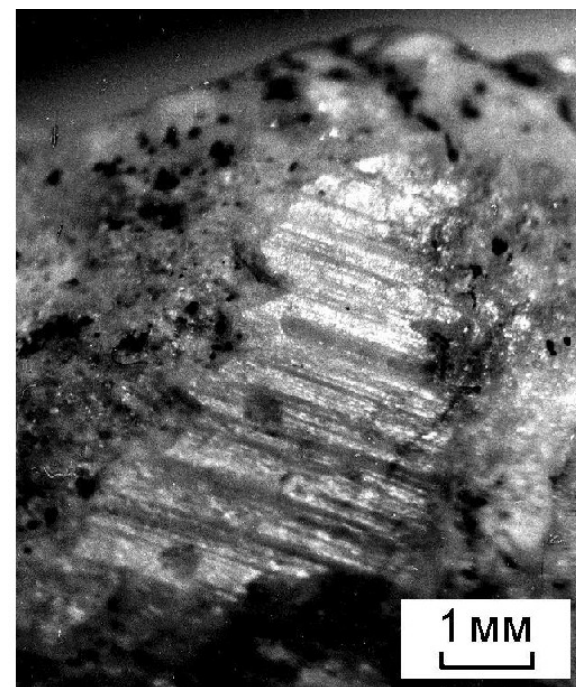


Рис. 9. Ударные зеркала скольжения с параллельными бороздками. Кварцитопесчаники Тыкбутакской свиты, обр. № 30А.

Брекчии «грис» и конусы разрушения являются хорошими полевыми признаками ударного метаморфизма, а конусы разрушения считаются его важным общепринятым критерием. Образование этих деформаций в крепких палеогеновых кварцитопесчаниках мишени связано с хрупко-пластической деформацией и указывает, что амплитуда ударной нагрузки была как минимум равна динамическому пределу упругости для кварца, то-

есть, составляла $\sim 3,5$ ГПа [28]. Для сравнения можно отметить, что конусы разрушения в кварц-полевошпатовых песчаниках Карской астроблемы образовались при ударных давлениях от 3,5 до 7 ГПа [2]. Что же касается импульсных нагрузок, необходимых для образования ударного кливажа и ударных зеркал скольжения в породах астроблемы Шийли, то их оценка представляет задачу специальных исследований. Можно лишь предположить, что в отличие от конусов разрушения, образование которых связано с неоднородностями ударно-волнового фронта (гипотеза Вишневого, [2]), образование ударных зеркал скольжения связано только с пластической деформацией.

Микроскопические признаки ударного метаморфизма в породах структуры представлены планарными элементами в кварце из палеогеновых кварцитопесчаников, обломки которых собраны в трёх пунктах астроблемы (рис. 5): в пределах кольцевой синклинали (2 пункта) и в поле пород кампанского яруса, слагающих обрамление купола (обломок 4×7 см предположительно из дайки брекчий). Эти кварцитопесчаники умеренно раздроблены и содержат ветвящимися прожилки микробрекчирования.

Планарные элементы наблюдаются как системы тонких прямолинейных оптических неоднородностей субмикронной толщины, с расстоянием между ними до 3-5 мкм (рис. 10). Часто они приурочены к краю зерна кварца или к участкам его деформации. В пределах зерна обычна одна, реже – 2-3 системы планарных элементов, но дополнительные системы выражены нечётко. Количество зёрен кварца с планарными элементами невелико – порядка нескольких десятков на стандартный шлиф породы (1-2 % от общего количества зёрен). Гистограмма ориентировок полюсов планарных структур относительно оси С кварца, полученная по данным 51 замера на Фёдоровском столике (рис. 11), имеет главный максимум в области ω -ориентировок (по $\{10\bar{1}3\}$) и два второстепенных максимума – по г,z-ромбоэдру $\{10\bar{1}1\}$ и по призме $\{10\bar{1}0\}$. Базальной ориентировки не встречено. Близкие особенности ориентировки планарных структур в кварце отмечены для астроблемы Холлефорд [15].

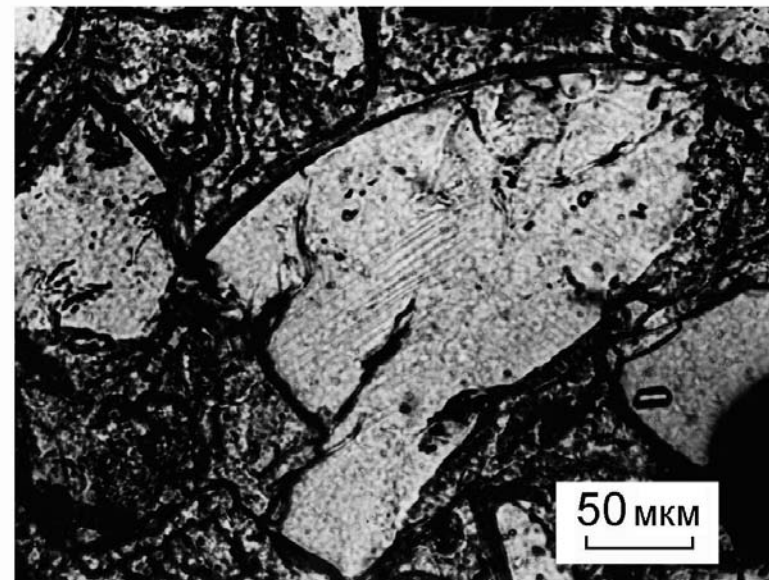


Рис. 10. Система планарных элементов в центральной и юго-западной части зерна кварца. Вдоль юго-восточной кромки этого же зерна слабо выражена другая система планарных элементов. Кварцитопесчаники Тыкбутакской свиты, обр. № 5, поляризованный свет, николи параллельны.

Планарные элементы, обнаруженные в кварце из пород астроблемы, являются важным индикатором ударного метаморфизма. Однако, оценка ударных давлений в изученных образцах с помощью существующих петрографических методов (например, по диаграмме [5]) представляется затруднительной, поскольку такие структуры деформации присутствуют лишь в немногих зёрнах минерала. Согласно [31], планарные элементы в кварце начинают появляться при ударном давлении $>5-7$ ГПа. Порог этой величины согласуется с общим низким уровнем ударного метаморфизма в породах астроблемы и принят нами для оценки ударных давлений в изученных образцах.

Некоторые оценки и реконструкция импактного события Шийли

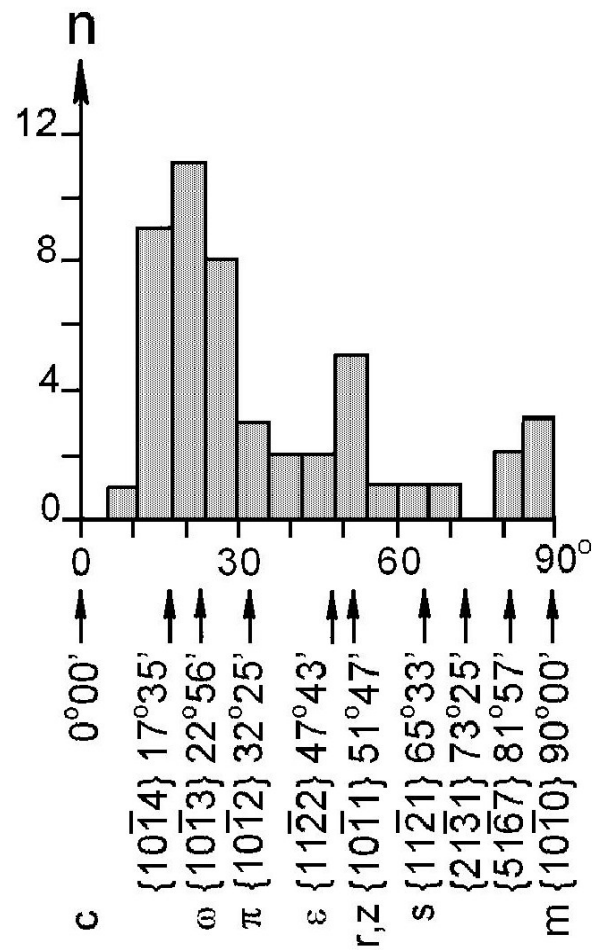


Рис. 11. Ориентировка полюсов планарных элементов по отношению к оси С кварца. По ординате гистограммы – количество замеров, по абсциссе – углы в градусах между полюсами планарных структур и осью С минерала, с интервалом в 6°. Кварцито-песчаники Тыкбутацкой свиты, результаты 51 замера на Фёдоровском столике.

Теория импактного кратерообразования позволяет сделать ряд полезных оценок для той или иной астроблемы, на основании которых можно производить различные реконструкции соответствующего импактного события. Стартовой основой для всех этих оценок является определение энергии взрыва E , выполняемое через диаметр кратера D по различным эмпирическим зависимостям, например, по формуле [17]: $E_{(M_{TNT})} \sim 2,4D^{3,4}_{(км)}$, которая, как отмечается в [10], является одной из наиболее удачных для земных кратеров гравитационного типа и использована ниже.

Оценка диаметра кратера для такой эродированной импактной структуры как астроблема Шийли на первый взгляд представляется невозможной. Однако, опираясь на представления ряда авторов [13, 27] о том, что геометрические параметры импактных кратеров связаны между собой не случайным образом, нам удалось решить эту задачу и оценить диаметр кратера Шийли по размеру сохранившегося элемента его структуры – центрального поднятия [4]. Для этого была построена зависимость «диаметр кратера – диаметр центрального поднятия» (рис. 9 в работе [4]). Следует отметить, что ранее, на обширном материале кратерных популяций планет Солнечной системы, такие попытки уже предпринимались [27]. Однако, выявленная этим автором зависимость характеризует соотношение видимых, то-есть, топографических элементов импактных структур и для наших целей не пригодна, так как, во-первых, во многих земных астроблемах центральное поднятие является погребённым и не всегда выражено в рельефе, а во-вторых, первичная топография центрального поднятия Шийли уничтожена эрозией. Для нашей диаграммы размер центрального поднятия сложных кратеров определялся по диаметру ограничивающего их кольцевого жёлоба. Как и следовало ожидать, при таком подходе список земных астроблем с центральным поднятием существенно расширился, а диаметры самих поднятий оказались, как правило, большими, чем по данным [27]. Вслед за нами, эмпирическая зависимость между диаметром кратера и диаметром центрального поднятия была рассмотрена другими авторами [20].

[21, 32], однако, мы считаем, что применение осредняющей прямой на диаграмме, сделанное этими авторами с целью получения математической зависимости между данными параметрами, неправомерно, так как чрезмерно упрощает процесс и маскирует его особенности. Обновлённая версия нашей диаграммы, построенная с учётом современных данных (таблица 1), приведена на рис. 12. Отметим, что для ряда астроблем нет согласованных данных по размеру рассматриваемых элементов, и возможные колебания этих размеров показаны на рис. 12 штрихами соответствующей длины, параллельными осям абсцисс и ординат. Предполагалось, что тип мишени мог повлиять на рассматриваемую зависимость, и это было тоже отражено на диаграмме.

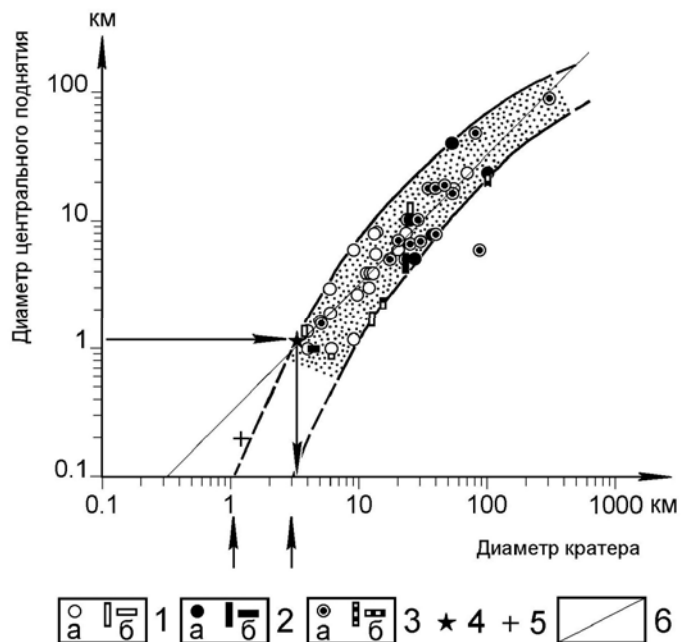


Рис. 12. Взаимосвязь между диаметром центрального поднятия и диаметром кратера для земных импактных структур по данным Таблицы 1.

Обозначения: 1, 2, 3 – кратеры на осадочной (вулканогенно-осадочной), кристаллической и сложной (осадочные + кристаллические породы) мишени, соответственно; для всех трёх обозначений:

Продолжение подписи к рис.12.

а – известные размеры рассматриваемых элементов кратера; б – предполагаемые размеры элементов (диапазон величины указан штрихами, параллельными осям координат); 4 – положение купола Шийли на диаграмме; 5 – положение Аризонского кратера; 6 – осредняющая линия, проведённая по данным [32].

Отметим, что Аризонский кратер диаметром ~1200 м с зародышевым центральным поднятием величиной ~200 м (наша интерпретация), которое по [29] слабо выражено в профиле его дна, занимает позицию, близкую к продолжению кривой, ограничивающей поле астроблем слева. Предполагаемое продолжение этого поля к оси X указывает на возможность существования земных кратеров диаметром от 1 до 3 км (стрелки ниже оси X), которые обладают центральным поднятием.

Полученная диаграмма обладает рядом интересных особенностей: 1) все астроблемы, за исключением структуры Чезапик, образуют некоторое компактное поле, которое можно ограничить слева и справа двумя кривыми; 2) ширина этого поля показывает, что зависимость между параметрами хотя и прямая, но достаточно сложная; можно видеть, что центральное поднятие одного и того же диаметра возможно в кратерах разного размера, и наоборот: кратер одного и того же диаметра может иметь центральное поднятие разной величины; 3) тип мишени определённым образом отразился на структуре поля: астроблемы на осадочных породах концентрируются, в основном, в левой или осевой части этого поля; таким образом, для центрального поднятия некоторой конкретной величины кратер на осадочной мишени будет меньше по диаметру, чем кратер с таким же поднятием на кристаллической мишени; тем не менее, некоторые астроблемы на кристаллических породах попадают в левую часть поля, а на осадочных – в правую; такие отклонения, вероятно, связаны с тем, что в ряде случаев плотность, скорость и другие особенности метеоритов являются не менее важным пороговым фактором в образовании центральных поднятий, чем механические свойства мишеней; 4) обращает на себя внимание перегиб контура поля при переходе от малых сложных кратеров к средним и большим импактным структурам данного типа; он в какой-то мере аналогичен широко известным (см. например, данные [26, 27]) изломам на семействе диаграмм, которые свя-

зывают геометрические параметры кратеров при переходе от простого к сложному типу этих импактных структур; по-видимому, этот перегиб поля отражает некоторую фундаментальную особенность импактного кратерообразования, связанную с масштабным эффектом, в основе которого лежит взаимодействие как фиксированных (свойства вещества на атомно-молекулярном уровне), так и случайных (энергия взрыва, объём возмущённой среды и другие) параметров процесса.

Согласно рис.12, диаметр кратера астроблемы Шийли при поперечнике её центрального поднятия в 1200 м мог составлять от 3,2 км до 9-9,5 км. Исходя из региональной стратиграфии и геологии купола Шийли, мы выбрали минимальное, - 3,2 км, - значение диаметра кратера из этого диапазона. В самом деле, даже для такого кратера глубина воронки, которая оценивается величиной ~160-200 м (~0,05-0,65 диаметра кратера по [8]), едва укладывается в возможный гипсометрический интервал существования кратера Шийли в разрезе мишени, то-есть, в интервал ~120-140 м между максимально-возможной высотой палеоповерхности в момент взрыва (+430-440 м) и современным положением пород в районе купола Шийли (+300-318 м). Амплитуда стратиграфического подъёма h пород в центральном поднятии является другим аргументом в пользу выбора минимального значения диаметра кратера. В куполе Шийли она составляет ~100 м, в то время как для стандартного кратера с диаметром $D = 3,2$ км она оценивается величиной ~200 м ($h_{(км)} \sim 0,06D^{1,1}_{(км)}$ по [22]).

Оценка энергии импактного события Шийли. Для кратера диаметром 3,2 км энергия взрыва E согласно зависимости [17], указанной выше, оценивается в $1,25 \times 10^2$ Мт TNT, или $5,2 \times 10^{17}$ Дж. Так как мишень импактного события представляла рыхлые увлажнённые осадочные породы, то в полученную оценку необходимо внести поправку на действие воды. Согласно данным [16, 24], взрывной кратер на обводнённой мишени может превышать по диаметру свой энергетический эквивалент на сухой мишени на 20-50 %. Принимая, что из-за малой прочности рыхлых пород чехла такое превышение могло быть максимальным – ~50 %, – получим, что диаметр кратера Шийли на сухой мишени составил бы ~2,1 км, а энергия взрыва согласно приведённой выше зависимости оценивается ~29,9 Мт TNT, или

$1,25 \times 10^{17}$ Дж. Эту величину мы используем в наших дальнейших оценках.

Таблица 1

Земные импактные структуры с центральным поднятием

Импактная структура	Диаметр кратера, км	Диаметр центрального поднятия, км	Мишень
Авак	12	4	Осадочная
Акраман	55 – 64	18	Вулканогенно-осадочная
<i>Амис</i>	16	5	Сложная
<i>Архивел Доум</i>	10	2,5	Осадочная
Арагуаинья	40	8	Сложная
Болтышская	24	10	Кристаллическая
Вредефорт	300	90	Сложная
Гарднос	5	1,5	Сложная
Госсез-Блафф	22	8	Осадочная
Декатурвиль	6	3	Осадочная
Жаманшин	13,5	1,5 – 2	Осадочная
Западная	4 – 5	1	Кристаллическая
Иль-Руло	4	1	Осадочная
Каменская	25	11 – 14	Осадочная
Карлинская	10	4	Осадочная
Карская	65	20 – 25	Осадочная
Карсуэлл	39	18	Сложная
Кентлэнд	13	4	Осадочная
Клируотер Восточный	26	5	Кристаллическая
Клируотер Западный	36	8	Кристаллическая
Курская	5	1,6	Осадочная
Логанчинская	20	6	Вулканогенно-осадочная
Логойская	15	2 – 2,5	Сложная
Маникуаган	100	24	Кристаллическая
Миддлсборо	6	0,8 – 0,9	Осадочная
Монтагнайс	45	19	Сложная
Мьолнир	40	8	Сложная
Мэнсон	35	18	Сложная
Оболонская	20	7,2	Сложная
Попигайская	100	20 – 25	Сложная
Пучеж-Катунская	80	45 – 50	Сложная
Рагозинская	9	1,2	Осадочная
Рис	24	6,6	Сложная
Рочечуар	23	4 – 5	Кристаллическая
Рэд Уинг	9	6	Осадочная
<i>Слэйт Айлэндс</i>	30	7	Сложная
Сильян	52	40	Кристаллическая
<i>Спидер</i>	13	5	Осадочная
<i>Стин-ривер</i>	25	6	Кристаллическая
<i>Стрэнгвэйз</i>	25	10?	Осадочная
Сьерра-да-Кангала	12	3	Осадочная
Сьерра-Мадера	13	8	Осадочная

Продолжение таблицы 1

Импактная структура	Диаметр кратера, км	Диаметр центрального поднятия, км	Мишень
<i>Тин-Бидер</i>	6	2	Осадочная
Уэллс-Крик	12	8,3	Осадочная
Флинн-Крик	3,8	1,2 – 1,5	Осадочная
Хафтон	24	5	Осадочная
Чезапик	85	6	Сложная
Чукча	6	1	Осадочная
Шарлевуа	54	16	Сложная
<i>Штейнхейм</i>	3,8	1,36	Осадочная
<i>Шумейкер (Тиг)</i>	28	10	Сложная

Примечание: сложная мишень включает осадочный чехол + кристаллический фундамент.

Таблица составлена по каталогам [9, 11, 20, 21] и по данным ряда доступных для авторов публикаций о конкретных астроблемах. Диаметр центрального поднятия указан (или оценен) по его подножию, то-есть, по линии перегиба кратерного днища (по тальвегу окаймляющего кольцевого жёлоба). Диапазон малых и средних кратеров охарактеризован достаточно детально; что касается трёх больших астроблем (Садбери, Мороквенг и Чикскулуб), то они не внесены в таблицу вследствие их недостаточной изученности и противоречивости данных. В таблицу не внесены также диаметры кольцевых гор, которые известны в ряде астроблем; для этих элементов кратерной структуры мы предполагаем иной, чем для центрального поднятия, механизм образования.

Масса и размер метеорита Шийли. Средняя скорость столкновения метеоритов с Землёй оценивается от ~24,6 км/с [30] до ~16,5 км/с [14]. Принимая скорость столкновения ~20 км/с и считая удар вертикальным, из уравнения $E = mV^2/2$, связывающего энергию взрыва E с массой m и скоростью V метеорита, масса космического тела Шийли оценивается величиной ~625 тыс т, а его диаметр, при сферической форме составлял ~53 м (железный метеорит с плотностью 7,9 г/см³) или ~70 м (хондрит с плотностью 3,5 г/см³).

Глубина проникновения метеорита в мишень. С известной долей условности, расстояние, на которое метеорит углубляется в мишень, прежде чем закончится стадия сжатия, считают точкой, где выделяется основная часть его кинетической энергии. Такая модель заглубленного точечного взрыва обеспечивает хорошее сходство импактных кратеров со взрывными воронками, полученными в экспериментах с заглубленными зарядами

ВВ и нередко применяется при анализе импактного кратерообразования. Глубина проникновения метеорита в мишень, или «глубина взрыва», сильно зависит от сжимаемости пород мишени и для каменных и железных метеоритов при скорости падения >15 км/с достигает ~1,5 – 2 диаметров упавшего тела [24]. Для рыхлых осадочных пород мишени Шийли мы приняли максимальную оценку глубины проникновения, ~100 м (1,5 диаметра для каменного и 2 диаметра для железного метеорита). Ниже сделана поправка к этой оценке, основанная на реконструкции мишени.

Осевое затухание ударной волны можно оценить несколькими способами, например, с использованием уравнения, предложенного в работе [6]: $P_{(кбар)} \sim 0,25E^{0,9}_{(Мг\ TNT)} z^{-2,7}$, где P – давление на фронте ударной волны, E – энергия взрыва, а z – глубина положения той или иной изобары ударной волны на вертикальной оси под центром взрыва. Согласно этому уравнению, затухание ударной волны в мишени импактного события Шийли было следующим (P , ГПа/ z , м): 100/130; 60/160; 35/195; 30/210; 20/240; 15/270; 10/310; 5/400 и 1/730. Следуя модели заглубленного точечного взрыва, к вычисленным значениям необходимо прибавить глубину проникновения метеорита в мишень, то-есть, ~100 м, для того, чтобы оценить осевое положение той или иной изобары относительно поверхности мишени.

Положение палеоповерхности мишени и свидетельство морского импактного события. В породах кампанского яруса и Тыкбутакской свиты вокруг купола Шийли обнаружены следы слабого ударного метаморфизма, соответствующие ударным нагрузкам от ~3,5 до 5-7 ГПа. Согласно оценкам затухания ударной волны, сделанным выше, изобара в 5 ГПа находилась на расстоянии ~400 м от центра взрыва. В исходном разрезе мишени эта изобара должна была проходить через точку М в породах Тыкбутакской свиты (рис. 13А). Проектируя по окружности с радиусом 400 м положение изобары в 5 ГПа на осевую линию структуры, мы попадаем в подошву отложений альбского яруса (точка N, с высотной отметкой +190 м, рис. 13А). Следовательно, в современной шкале высот, центр взрыва Шийли находился бы на отметке +590 м, а палеоповерхность мишени, с учётом глубины проникновения метеорита в неё – на отметке +690 м. Однако, согласно региональной стратиграфии, макси-

мальные высотные отметки палеоповерхности кайнозойских отложений региона не превышали +430 – +440 м в современной шкале высот. Мы не видим каких-либо причин, позволяющих усомниться в надёжности всех перечисленных аргументов, и поэтому можем заключить, что недостающая часть мишени, не менее 250-260 м, была представлена морской водой, и импактное событие Шийли было морским.

При предварительном обсуждении материалов высказывалось мнение о том, что слабый ударный метаморфизм в породах купола Шийли может быть результатом множественного удара обломков распавшегося в атмосфере космического тела, и поэтому слоя воды в составе мишени не требуется. Однако, купол Шийли обладает чёткой осевой симметрией, и гипотеза множественного удара была исключена.

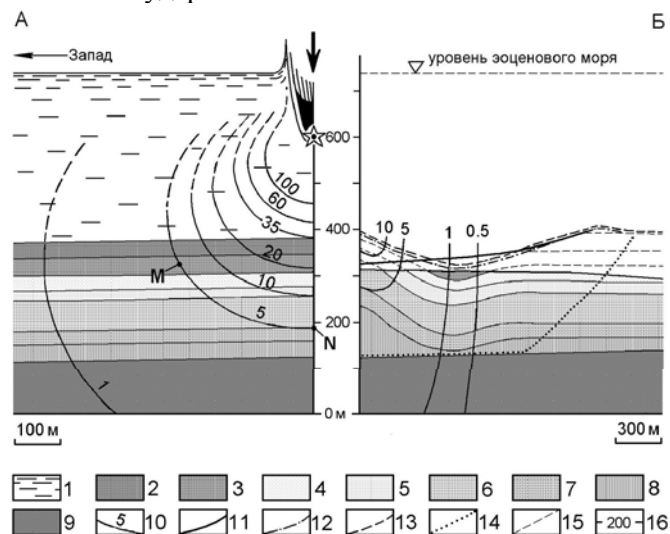


Рис. 13. Реконструкция импактного события Шийли (А) и предполагаемой структуры астроблемы в варианте мелкого кратера (Б), образованного ударом каменного метеорита.

Легенда. Мишень: 1 – водный слой; 2 – породы Акчатской свиты; 3 – породы Тыкбутацкой свиты; 4 – породы кампанского яруса; 5 – породы сантонского яруса; 6 – породы альбского яруса; 7 – породы аптского яруса; 8 – породы готеривского яруса; 9 – породы палеозойского фундамента. **Прочие обозначения:** 10 – изобары ударной волны и их значения (на рис. 13А приведено затухание для воды, оцененное

Продолжение подписи к рис.13.

по данным [12]; на рис. 13Б показаны следы изобар в мишени, оцененные по затуханию ударной волны в горных породах); 11 – предполагаемый рубеж экскавации грунта; 12 – предполагаемый профиль кратерного дна; 13 – предполагаемый покров турбулентных аллогенных отложений; 14 – предполагаемый рубеж импактных дислокаций в породах мишени; 15 – предполагаемые границы эродированных пород осадочного чехла; 16 – современная шкала высот.

Наличие толщи морской воды в составе мишени импактного события Шийли позволяет сделать поправки к некоторым оценкам, сделанным выше. 1. Проникновение метеорита Шийли в водную толщу можно моделировать процессом импактного удара на ледяной мишени. Согласно данным [24], глубина проникновения в мишень может быть ~2-3 диаметров метеорита, то-есть, ~150 м (2 диаметра для каменного и 3 диаметра для железного тела). Соответственно, оценка глубины моря должна быть увеличена на ~50 м. 2. Согласно кайнозойской истории геологического развития региона (средне-эоценовая регрессия морского бассейна), континентальные отложения Казацкой свиты должны быть исключены из состава мишени. Следовательно, глубина морского бассейна должна быть увеличена дополнительно на 30-40 м. 3. Морской режим, существовавший на момент импактного события, не исключает, что в составе мишени могли присутствовать отложения Акчатской свиты. В результате всех этих поправок, дно палеогенового морского бассейна на месте удара в нынешних высотных отметках располагалось бы на высоте ~+380 м, глубина моря составляла ~360 м, а палеоповерхность мишени (уровень моря) находился на высоте ~+740 м (рис. 13А).

Согласно данным о затухании ударной волны в воде [12], амплитуда её затухания на оси взрыва в случае импактного события Шийли (скорость удара 20 км/с, начальное давление ударной волны ~230 ГПа, диаметр метеорита от 53 м в железном варианте до 70 м в каменном варианте) может быть оценена следующим образом (Р, ГПа/z, м): а) железный вариант – 100/101; 60/130; 35/156; 20/205; 10/250; и 5/306; б) каменный вариант – 100/133; 60/172; 35/206; 20/271; 10/331 и 5/405. Можно видеть, что в пределах рассматриваемой амплитуды давлений, ~5 ГПа, оценки затухания ударной волны, сделанные как

для водного слоя, так и приведённые выше для случая горной породы, очень близки, и глубину морского бассейна, показанную на рис. 13А (вариант каменного метеорита), можно оставить без изменения. В варианте железного метеорита Шийли глубину моря следовало бы сократить на величину ~100 м, но принципиально это не меняет заключения о морском характере импактного события Шийли. Следует также отметить, что при переходе ударной волны из воды в донные осадки должен наблюдаться ряд пограничных явлений [12], в том числе и незначительное повышение давления, однако, на уровне оценок, этими явлениями можно пренебречь, поскольку они также не приведут к принципиально новым интерпретациям.

Реконструкция импактного события и предполагаемое строение эродированной части астроблемы Шийли показаны на рис. 13А,Б. Около 1/2 толщи моря было пробито метеоритом, прежде чем он передал свою кинетическую энергию водной части мишени.

Оценка затухания ударной волны показывает, что донные осадки (породы Акчатской и Тыкбутакской свит) не подверглись импактному плавлению. По-видимому, не состоялась также баллистическая экскавация донного грунта в составе взрывного облака, если вслед за [7] считать, что рубеж такой экскавации ограничен изобарой ударной волны в 35 ГПа. Сохранность почти всего разреза пород чехла в астроблеме показывает, что кратер, если он образовался вообще, был очень мелким, глубиной не более 50 м, так как в пределах кольцевого жёлоба он не углубился ниже пород Тыкбутакской свиты. Очевидно, кратерообразование в придонной части мишени ограничилось центробежными перемещениями грунта в виде мутьевых потоков. Свежий кратер, если он образовался, мог быть окаймлён небольшим валом из обломков пород мишени и зоной приповерхностных дислокаций в донных осадках. Возможно, что остатками такой зоны являются дислокации пород кампанского яруса, наблюдаемые к югу от купола. Мелкий кратер или даже его полное отсутствие является, вероятно, типичной особенностью для тех морских импактных структур, в которых соотношение размера метеорита и мощности водного слоя таково, что до дна доходит лишь значительно ослабленный ударно-волновой импульс. Примером такого типа может служить океаническое им-

пактное событие Эльтанин, описанное в работе [19]. На значительном расстоянии вокруг астроблемы Шийли мог отложиться маломощный импакто-кластический горизонт материала, обогащённого обломочным, расплавленным и конденсированным испарённым материалом метеорита. Остатки этого горизонта вероятны в непрерывном разрезе верхне-эоценовых морских отложений, которые сохранились в регионе.

Наиболее интересной особенностью астроблемы Шийли является её центральное поднятие. Так как кратер астроблемы был очень мелким или отсутствовал вовсе, то эродированная часть этого поднятия могла включать частичный или полный разрез пород Тыкбутакской свиты (рис. 13Б) или даже Акчатской свиты. Происхождение центрального поднятия астроблемы представляет особый интерес. Отметим, что механизм образования таких поднятий в сложных кратерах является предметом дискуссии. Кроме гипотезы упругой отдачи [10, 13] здесь предлагается механизм гравитационного обрушения кратера, который сейчас разделяется многими исследователями [8, 17 и др.], и некоторые другие гипотезы. Однако, для астроблемы Шийли с её мелким или даже отсутствовавшим кратером гравитационное обрушение воронки исключено. В связи с отсутствием структурного подъёма пород фундамента центральное поднятие астроблемы не представляет также «штамповую» структуру. Согласно геологическим данным, оно возникло вследствие центростремительного движения пород осадочного чехла, и в строении купола наблюдаются явные следы такого движения. Максимальную деформацию типа течения испытали слои пластичных глин готеривского яруса, залегающие в основании осадочного чехла. Возможно, это связано с тем, что более жёсткие в механическом отношении породы фундамента на приложенную нагрузку уже не реагировали. Сокращение мощности готеривских глин вследствие их подтока к оси поднятия вызвало компенсационную просадку пород чехла и образование кольцевого жёлоба вокруг купола, в котором породы Тыкбутакской свиты сохранились от эрозии.

Механизм происхождения центрального поднятия астроблемы Шийли мы рассматриваем в рамках гипотезы упругой отдачи. Роль этой отдачи в образовании центральных поднятий предполагалась ещё Болдуиным [13]. Развивая гипотезу упру-

гой отдачи в рамках модели кратерообразования по [18], мы предполагаем следующий сценарий образования центрального поднятия астроблемы. Процесс упругой отдачи, обеспечивший возвратное центростремительное движение возмущённого материала, действовал в некотором шаровом секторе зоны сжатия под центром взрыва. В пределах этого сектора изобары ударной волны и волны разгрузки были параллельны друг другу. Итоговое движение грунта в данном секторе представляло результат суммирования массовой скорости частиц (центробежный вектор) и скорости квази-упругого расширения материала в волне разгрузки (центростремительный вектор), с доминированием последнего. Схематическое движение грунта при образовании астроблемы Шийли с учётом модели упругой отдачи показано на рис. 14. Обращает на себя внимание довольно широ-

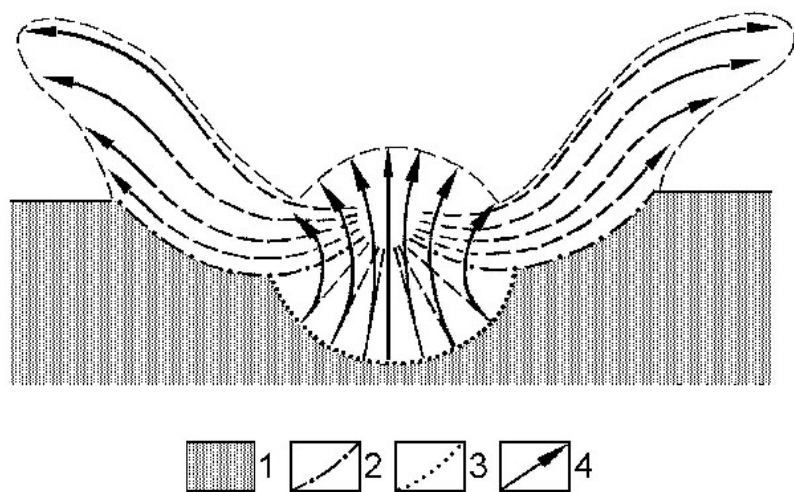


Рис. 14. Схематическое движение грунта при кратерообразовании с формированием центрального поднятия по модели упругой отдачи.

Обозначения: 1 – породы мишени; 2 – рубез латерального центростремительного течения; 3 – рубез некоторого сферического сектора в зоне сжатия пород мишени, где изобары ударной волны и волны разгрузки были параллельны; 4 – траектории движения грунта.

кий, $\sim 120^\circ$, телесный угол раствора шарового сектора, в котором эти движения происходили (см. геологический разрез на рис. 6). Пример астроблемы Шийли показывает, что упругая отдача является одним из реальных механизмов образования центральных поднятий в земных импактных структурах, о чём мы уже сообщали [4, 33], и не должна игнорироваться. В этом отношении астроблема Шийли довольно уникальна и может служить модельным объектом для изучения проблемы образования центральных гор и развития гипотезы упругой отдачи. Добавим, что недавно была описана ещё одна импактная структура – купол Апхивэл, – которая геологически почти аналогична астроблеме Шийли, и для которой авторы [25] также предполагают сходный с нашим механизм образования центрального поднятия.

Возраст астроблемы. Только по стратиграфическим данным импактное событие Шийли датируется очень неопределённо, в интервале от палеоцена-нижнего эоцена (породы Тыкбу-такской свиты в составе мишени) до плиоцена (суглинки перекрывающего комплекса). Однако, вывод о наличии морского бассейна на момент этого события позволяет существенно уточнить его возраст и считать, что оно произошло в период от раннего до среднего эоцена, то-есть, в интервал времени от 39 до 53 млн лет в абсолютном летоисчислении.

Заключение

Купол Шийли представляет морскую эродированную астроблему эоценового возраста, заложенную на осадочной мишени. В этой астроблеме обнаружены надёжные признаки ударно-взрывного происхождения, однако комплекс этих признаков несколько специфичен. С одной стороны, здесь наблюдаются характерные геологические и топографические признаки эродированной импактной структуры сложного типа (бескорневой купол с чёткой осевой симметрией) и следы ударного метаморфизма; с другой стороны, астроблема никак не выражена в физических полях (хотя общепринятым геофизическим критерием импактных структур среднего размера считаются гравитационные и магнитные аномалии), а ударный метаморфизм документируется только на уровне начальной ступени. Отчасти, это свя-

зано с особенностями пород мишени и эродированностью астроблемы Шийли, но с другой стороны, следует из морской специфики её происхождения.

Поиск и диагностика астроблем типа Шийли представляет более сложную задачу, чем это делается для импактных структур с хорошо выраженным стандартным набором морфологических, геологических и геофизических критериев, к которым добавляются петрографические и минералогические следы ударного метаморфизма средней и высокой ступени (высокобарические фазы, широкий спектр планарных микродеформаций в минералах, диаплектические стёкла, ударное плавление). Большую роль в поисках астроблем типа Шийли, особенно на стадии реконструкции, приобретает такой признак, как аномальность объекта с точки зрения региональной геологии. Резерв неоткрытых импактных структур со специфическим или «стёртым» набором диагностических признаков по-видимому достаточно велик, и их поиск представляет актуальную задачу как в пределах уральского региона, так и на других территориях. Но если Вам придётся диагностировать астроблему типа Шийли, а Ваш исследовательский инструментарий заведомо ограничен только стандартным набором критериальных признаков, а среди них – только следами ударного метаморфизма средних и высоких ступеней, то Вы можете потерпеть неудачу.

Ударные зеркала скольжения, описанные при характеристике астроблемы Шийли, мы предлагаем рассматривать как один из макроскопических критериев слабого ударного метаморфизма. Брекчии «грис» и ударный кливаж, хотя условия их образования изучены недостаточно, также являются хорошим полевым признаком низкоамплитудного ударного воздействия и не должны игнорироваться, особенно в районах со спокойным геологическим развитием. Центральное поднятие астроблемы Шийли представляет большой интерес, поскольку оно заведомо образовалось без участия процессов гравитационного коллапса кратера, изостазийной релаксации и других дискутируемых механизмов. В этом отношении астроблема представляет уникальный модельный объект для изучения проблемы образования центральных гор и развития гипотезы упругой отдачи.

Благодарности. В процессе исследований авторы пользовались поддержкой и ценными консультациями со стороны В.В. Юриша, Р.А. Сегедина и других работников местной геологической службы г. Актюбинска (ОАО «Запрудгеология»). В полевых исследованиях принимал участие геолог Средне-Уральской геолого-разведочной экспедиции В.Н. Лагутенко. Полезные замечания были высказаны Х. Дупвиком (Университет Осло, Норвегия), который интересуется морскими астроблемами и ознакомился с рукописью статьи.

Литература

- 1. Вишневский С.А.** Логанчинская астроблема в траппах Тунгусской синеклизы. Новосибирск: изд.-во Института Геологии и Геофизики СО АН СССР, 1984а. 28 с.
- 2. Вишневский С.А.** Ударные конусы и брекчии «грис» в Карской астроблеме. В кн.: Метеоритные исследования в Сибири (под ред. Ю.А. Долгова). Новосибирск: изд.-во Наука, 1984б. С. 160-176.
- 3. Вишневский С.А.** Чукчинская котловина: глубоко-эродированный импактный кратер на Северном Таймыре. Новосибирск: изд.-во Института Геологии и Геофизики СО АН СССР, препринт, 1992. 49 с.
- 4. Вишневский С.А. и Коробков В.Ф.** Купол Шийли – эродированная астроблема в Западном Примугоджарье. Новосибирск: изд.-во Института Геологии и Геофизики СО АН СССР, 1989. 51 с.
- 5. Гуров Е.П., Гурова Е.П. и Ракицкая Р.Б.** Об ориентировке систем планарных элементов в кварце из пород взрывных метеоритных кратеров. // Записки ВМО, 1979. Ч. 108 № 5. С. 578-584.
- 6. Иванов Б.А., Базилевский А.Т. и Сазонова Л.В.** Об образовании центрального поднятия в метеоритных кратерах. // Метеоритика, 1982. № 40. С. 67-81.
- 7. Масайтис В.Л.** Гигантские метеоритные удары: некоторые модели и их следствия. В кн. Современные идеи теоретической геологии (под ред. Д.В. Рундквиста). Ленинград: изд.во Недра, 1984. С. 151-179.
- 8. Мелош Г.** Образование ударных кратеров: геологический процесс. М.: Мир, 1994. 336 с.
- 9. ПДК ИСЗ:** Постоянно дополняемый каталог импактных структур Земли. См. Whitehead J. Earth Impact Database (<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase.html>).
- 10. Садовский А.М., редактор.** Ударные кратеры на Луне и планетах. Москва: изд.-во Наука, 1983. 200 с.
- 11. Фельдман В.И.** Каталог астроблем и метеоритных кратеров Земли. // Метеоритика, 1987. № 46. С. 154-171.
- 12. Artemieva, N.A., and Shuvalov, V.V.** Shock metamorphism on the ocean floor (numerical simulations). // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2002. Vol. 49. Iss. 6. P. 959-968.

13. Baldwin, R.B. The measure of the Moon. Chicago: University of Chicago Press, 1963. 488 p.

14. Bottke W.F., Nolan M.C., Greenberg R., and Kolvord R.A. NEA collisional lifetimes and impact statistics of near-Earth asteroids. In: Gehrels T. (ed.), *Impact Hazards due to Comets and Asteroids*. Tucson: University of Arizona Press, 1994. P. 337-357.

15. Bunch, T.E. Some characteristics of selected minerals from craters. In: French, B.M., Short, N.M. (eds.), *Shock Metamorphism of Natural Materials*. Baltimore: Mono Book Corp., 1968. P. 413-432.

16. Butkovich, T.R. Influence of water in rocks on effects of the underground nuclear explosion. // *Journal of Geophysical Research*, 1971. Vol. 76. № 8. P. 1993-2011.

17. Dence, M.R., Grieve, R.A.F., Robertson, P.B. Terrestrial impact structures: principal characteristics and energy considerations. In: Roddy, D.J., Pepin, R.O., Merrill, R.B. (eds.), *Impact and Explosion Cratering*. New York: Pergamon Press, 1977. P. 247-275.

18. Gault, D.E., Quaide, W.L., and Oberbeck, V.R. Impact cratering mechanics and structures. In: French, B.M., Short, N.M. (eds.), *Shock Metamorphism of Natural Materials*. Baltimore: Mono Book Corp., 1968. P. 87-99.

19. Gersonde, R., Kyte, F.T., Bleil, U., Diekmann, B., Flores, J.A., Gohl, K., Grahl, G., Hagen, R., Kuhn, G., Sierro, F.J., Volker, D., Abelman, A., and Bostwick, J.A. Geological record and reconstruction of the Late Pliocene impact of the Eltanin asteroid in the Southern Ocean. // *Nature*, 1997. Vol. 390. № 6658. P. 357-363.

20. Grieve, R.A.F. Terrestrial impact structures. // *Annual Reviews on Earth and Planetary Science*, 1987. Vol. 15. P. 245-270.

21. Grieve, R.A.F. Terrestrial impacts: the record in the rocks. // *Meteoritics*, 1991. 1991. Vol. 26. P. 175-194.

22. Grieve, R.A.F., Robertson, P.B., and Dence, M.R. Constraints on the formation of ring impact structures, based on terrestrial data. In: Schultz, P.H., Merrill, R.B. (eds.), *Multiring Basins. Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference*, 1981. Vol. 12A. P. 37-57.

23. James, O.B. Shock and thermal metamorphism of basalt by nuclear explosion, Nevada Test Site. // *Science*, 1969. Vol. 166. № 3913. P. 1615-1620.

24. Kieffer, S.W., and Simmonds, C.H. The role of volatiles and lithology in the impact cratering processes. // *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1980. Vol. 18. № 1. P. 143-181.

25. Kriens B.J., Herkenhoff K.E., and Shoemaker E.M. The structure and kinematics of a complex crater: Upheaval Dome, Southern Utah. In: *Conference on Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution (Sudbury-1997)*. Lunar and Planetary Institute contribution #922. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1997. P. 29-30.

26. Pike, R.J. Size-dependence in the shape of fresh impact craters on the Moon. In: Roddy, D.J., Pepin, R.O., Merrill, R.B. (eds.), *Impact and Explosion Cratering*. New York: Pergamon Press, 1977. P. 489-509.

27. Pike, R.J. Some morphologic systematics of complex impact structures. // *Meteoritics*, 1985. 1985. Vol. 20. № 1. P. 49-68.

28. Robertson, P.B. Zones of shock metamorphism at the Charlevoix impact structure, Quebec. // *Geological Society of America Bulletin*, 1975. Vol. 86. № 12. P. 1630-1638.

29. Shoemaker, E.M. Impact mechanics at Meteor Crater, Arizona. In: Middlehurst, B.M., and Kuiper, G.P. (eds.), *The Solar System*. Vol. 4. The Moon, meteorites and comets. Chicago: University of Chicago Press, 1963. P. 301-336.

30. Shoemaker, E.M. Astronomically-observed crater-forming projectiles. In: Roddy, D.J., Pepin, R.O., Merrill, R.B. (eds.), *Impact and Explosion Cratering*. New York: Pergamon Press, 1977. P. 617-628.

31. Stöffler, D., and Langenhorst, F. Shock metamorphism of Quartz in Nature and Experiment: basic observations and theory. // *Meteoritics*, 1994. Vol. 29. P. 155-181.

32. Therriault, A.M., Grieve, R.A.F., and Reimold, W.U. Original size of the Vredefort Structure: Implications for the geological evolution of the Witwatersrand Basin. // *Meteoritics and Planetary Science*, 1997. Vol. 32. P. 71-77.

33. Vishnevsky, S.A., and Korobkov, V.F. Marine impact site Shiyli: origin of central uplift due to elastic response of target rocks. In: Gersonde, R., and Deutsch, A. (eds.), *ESF-Impact Workshop "Oceanic impacts: mechanisms and environmental perturbations, April 15-17, 1999, Bremerhaven, Germany"*. // *Berichte zur Polarforschung*, 1999. № 343. P. 100-102.