

# **ПРОНИКНОВЕНИЕ ФРАГМЕНТА ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА ЧЕРЕЗ ЛЕД ОЗЕРА ЧЕБАРКУЛЬ: ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

***Б.А. Иванов***

15 февраля 2013 г. крупный каменный метеорит вошел в атмосферу Земли и разрушился в несколько этапов над городом Челябинск. Основная масса мелких обломков выпала на поверхность с малой (терминальной) скоростью, однако зафиксировано падение, по крайней мере одного крупного (~600 кг) обломка, пробившего лед на озере Чебаркуль. Позднее этот обломок (или его часть) был извлечен со дна озера. В месте падения образовалась округлая полынья размером 6–8 м, частично покрытая плавающим льдом. В настоящей работе проводится предварительный анализ процесса образования этой полыньи с учетом минимальной (обнаруженной) массы обломка и его скорости, оцененной величиной, близкой к терминальной скорости падения данной массы в атмосфере.

## **Введение**

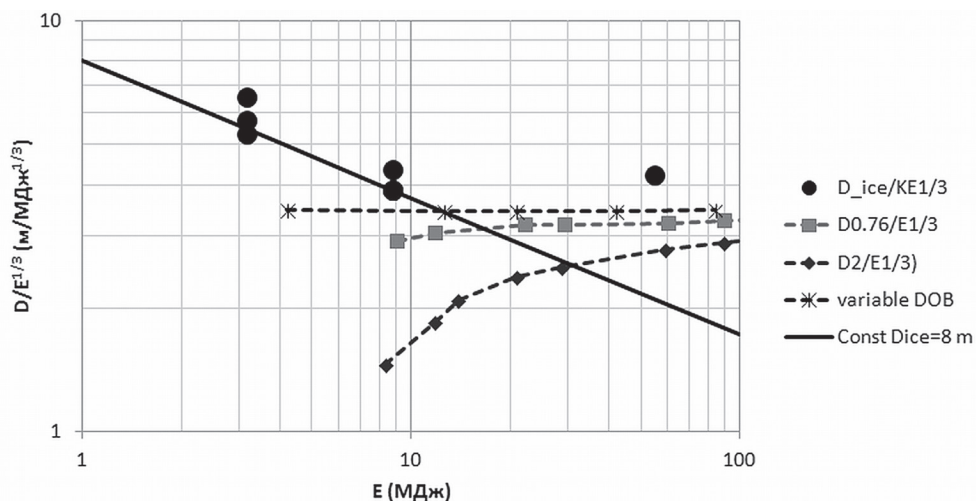
Падение Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г. считается крупнейшим событием такого рода со времени Тунгусского взрыва 1908 г. [Galimov, 2013; Popova et al., 2013]. Анализ инструментальных наблюдений позволил сделать с высокой достоверностью оценки орбиты, начальной массы и процесса дробления Челябинского метеороида в атмосфере [Borovicka et al., 2013; Popova et al., 2013]. Детали распределения по размерам собранных обломков метеорита описаны в дополнительных материалах к статье Поповой и др. [Popova et al., 2013]. Там же подробно описана находка на озере Чебаркуль округлой полыньи размером 6–8 м. Была найдена запись фоторегистратора, зафиксировавшего момент удара по льду, позднее на дне озера вблизи полыньи был обнаружен и поднят на поверхность фрагмент метеорита массой около 600 кг (см. дополнительные материалы к [Popova et al., 2013]).

Первые расчеты удара по льду (раздел G. Gisler в доп. материалах к [Popova et al., 2013]) были проведены, судя по рисункам, только для начальной стадии проникновения метеоритного фрагмента через лед. Целью данной работы является численное моделирование Чебаркульского падения до более поздних стадий процесса (образование переходной полости и ее схлопывание) и анализ результатов моделирования в контексте известных данных о взрывании льда и ударов в воду, не покрытую льдом.

## Взрывная аналогия

Для постановки задачи численного моделирования Чебаркульского падения полезно оценить энергию события по данным о взрывах подо льдом. Взрывание плавающего льда является широко применяемым методом регулирования ледохода на реках и озерах [Саков et al., 1998; Mellor, 1987]. Полной аналогии между взрывом и ударом нет, так как процесс подводного взрыва включает расширение в воде газового пузыря, заполненного продуктами детонации, в то время как полость в воде при ударе образуется за счет кинетической энергии, переданной в воду при торможении ударника. Однако по опыту сравнения взрывов и ударов в песчаной мишени можно предположить близость величин энергии источника для схожих параметров кратера [Oberbeck, 1971].

Здесь наиболее интересны данные о взрывах зарядов непосредственно под поверхностью льда [Van der Kley, 1965] (цитируется по рисункам в [White and Kay, 1996], доступной в Интернете в книгах Гугла). Доступные данные для льда толщиной 0,76 и 2 м показаны на рис. 1 (данные численного моделирования обсуждаются ниже). Для сравнения показаны рекомендации МЧС [Саков et al., 1998] для переменной приведенной глубины заряда подо льдом, толщиной от 0,6 до 0,8 м. Веса зарядов пересчитаны в энергию взрыва в МДж.



**Рис. 1.** Приведенный диаметр полыньи в плавающем ледяном поле,  $D/E^{1/3}$  (м/МДж<sup>1/3</sup>), при модельных ударах (черные кружки), описанных ниже, и взрывах: серые квадраты – взрыв подо льдом и ромбы – взрыв на нижней поверхности льда толщиной 76 см и 2 м, соответственно [Van der Kley, 1965]; звездочки – взрывы на различной глубине подо льдом толщиной 60–80 см [Саков et al., 1998]

Размер Чебаркульской полины, принятый здесь равным 8 м, показан на рисунке сплошной наклонной линией, соответствующей уменьшению приведенного размера  $D/E^{1/3}$  при увеличении энергии  $E$ , отложенной по горизонтальной оси рис. 1. Пересечение этой зависимости с экспериментальными данными о подледных взрывах происходит при энергии порядка 10–15 МДж, что соответствует весу заряда ВВ в диапазоне 2–4 кг. Представляется разумным предположить, что кинетическая энергия Чебаркульского фрагмента должна быть близка к этой величине.

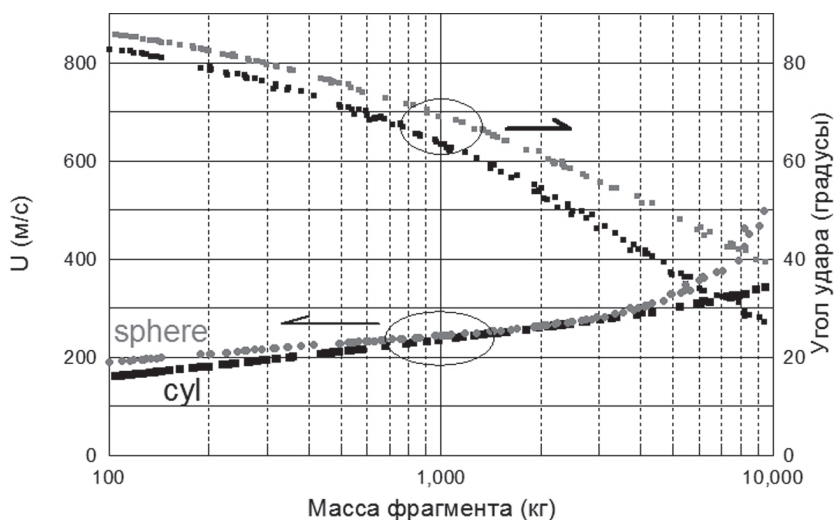
### Скорость и угол падения Чебаркульского фрагмента

Опубликованные в статье Поповой и др. [Popova et al., 2013] оценки (G. Gisler) указывают на диапазон параметров удара, пробивающего лед толщиной 70 см при температуре льда  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в пределах 100–1000 кг при скорости 600–1300 м/с. Из общего моделирования разрушения метеорита Попова и др. [Popova et al., 2013] предполагают угол падения затормозившихся в атмосфере обломков порядка  $45^{\circ}$  (как это упомянуто G. Gisler на стр. 87 Дополнительных материалов). Энергия таких ударов составляет от 18 до 170 МДж; нижний предел этих оценок соответствует выводам из взрывной аналогии (рис. 1). Однако в таблице S15 в [Popova et al., 2013] скорость удара фрагмента массой 600 кг оценивается в 225 м/с (что близко к терминальной скорости падения шара). Расхождение в оценках скорости Чебаркульского фрагмента внутри одной статьи ( $\sim 1000$  м/с в разделе G. Gisler'a против 250 м/с в таблице S15) привело к необходимости сделать независимые («во вторую руку») расчеты.

Использовалась модель каскадного дробления, когда каждый обломок, начиная с родительского тела, делится на две части, причем соотношение масс новых фрагментов к массе фрагмента, их порождающего, выбирается как случайное число в диапазоне от 0,5 (равные фрагменты) до, практически, нуля (родительский фрагмент выживает) [Ivanov et al., 2009]. Высоты фрагментации распределены равномерно от 20 до 30 км высоты. В качестве начальных условий взяты параметры входа метеорита из [Popova et al., 2013] – предполагается, что на высоте 100 км родительское тело массой 10,128.876 тонн (шар диаметром 18 м при плотности  $3300\text{ кг/м}^3$ ) имеет скорость 19,16 км/с, направленную под углом  $18,3^{\circ}$  к местному горизонту (первая строка табл. S5a, [Popova et al., 2013]).

Для расчета движения обломков в атмосфере Земли использовалась программа, основанная (любезно предоставленная) на первичном коде, ранее созданная авторами работы [Artemieva and Shuvalov, 2001]. Были рассчитаны два модельных случая: (1) – все фрагменты имеют сферическую форму и (2) – все фрагменты имеют цилиндрическую форму с высотой, равной диаметру и летят торцом вперед. Зависимость коэффициента сопротивления  $c_D$  от числа Маха  $M$  для сферы была принята такой же, как и в [Popova et al., 2013]:  $c_D = 0,43$  для  $M < 0,5$  и  $c_D = 1$  для  $M > 1,4$  с плавным переходом в интервале  $0,5 > M > 1,4$ . Для цилиндра экспериментальные данные, собранные в [Hoerner, 1965], были аппроксимированы в виде:  $c_D = 0,8$  для  $M < 0,8$  и  $c_D = 1,7$  для  $M > 1,7$  с плавным переходом в интервале  $0,8 > M > 1,7$ . Модель порождает рой обломков, каждый из которых движется в невозмущенной атмосфере. Результаты интегрирования движения в стандартной атмосфере для фрагментов в интересующем нас диапазоне размеров показаны на рис. 2.

В наиболее вероятном диапазоне масс обломков (от найденного в  $\sim 600$  кг до в несколько раз большей массы) прямое моделирование дает оценки скорости уда-



**Рис. 2.** Расчетные скорости (левая ось) и углы удара (правая ось) для фрагментов массой от 100 кг до 10 тонн в предположении сферической (серые значки) и цилиндрической (черные значки) формы фрагментов

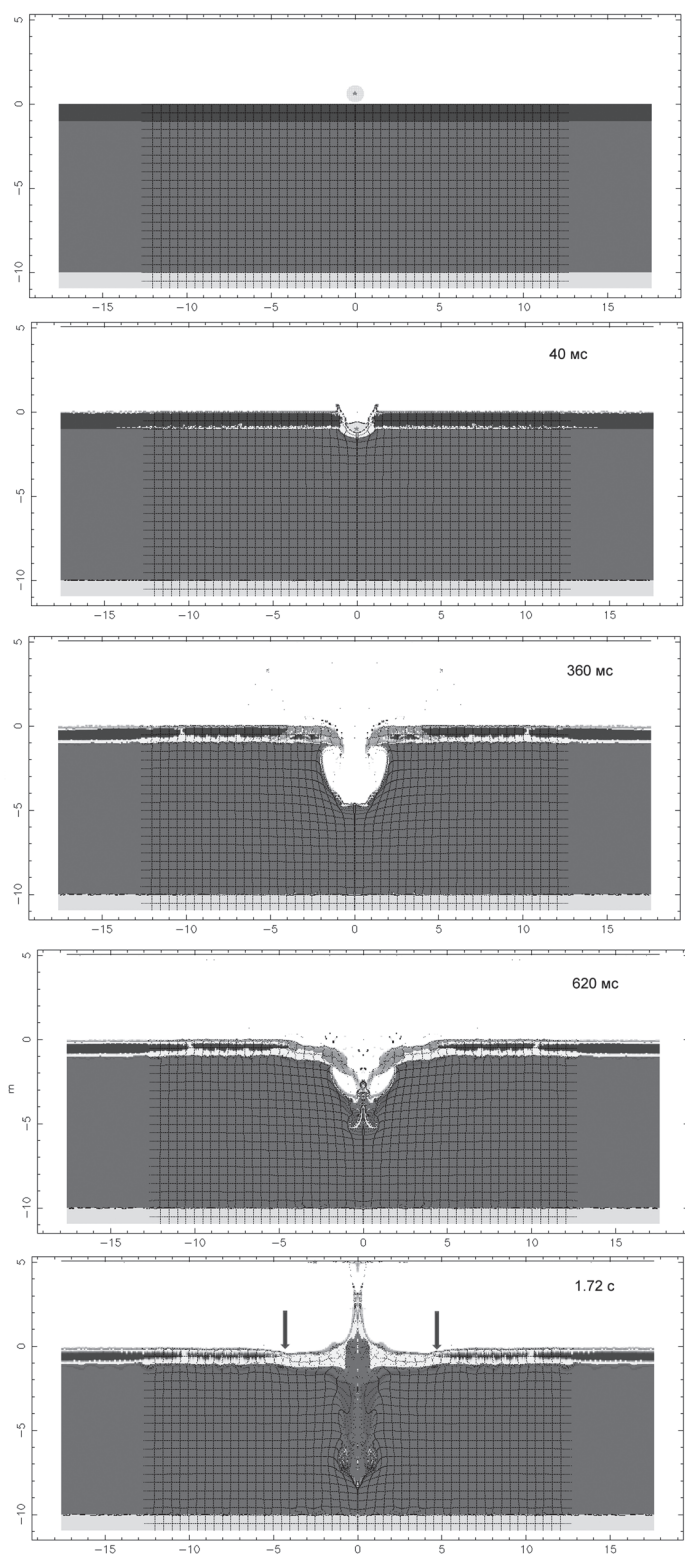
ра 220–250 м/с и угол удара (к горизонту) в диапазоне 60–70°, что близко к вертикальному соударению, которое можно моделировать в двумерной осесимметричной постановке.

Численная модель проверялась на примере вертикального падения одиночного тела через экспоненциальную атмосферу и показала хорошее соответствие известному аналитическому решению.

### Численное моделирование

Для интегрирования использовалась двумерная осесимметричная программа SALEB [Иванов, 2005], модифицированная из программы SALE [Amsden et al., 1980]. Разрушение и прочность льда и горных пород описаны ранее [Collins et al., 2004; Ivanov et al., 2010; Ivanov and Pierazzo, 2007; Ivanov and Pierazzo, 2011]. Уравнение состояния льда/воды [Иванов, 2005] задавалось в табличном виде; термодинамика каждой фазы рассчитывалась по программе ANEOS [Thompson and Lauson, 1972]; материал метеорита описывался в табличном виде с ANEOS-параметрами из [Benz et al., 1989].

Начальные условия (несколько варьировавшиеся в процессе работы) в базовом варианте включают лед толщиной 1 м на поверхности водоема глубиной 10–15 м. Дно водоема задавалось как скальное основание, так и как жесткая граница. Радиус бассейна варьировался от ~15 до ~60 м. В центральной области расчетная зона покрыта регулярной сеткой с шагом  $\Delta x = \Delta y$ . Шаг составлял от 0,05 до 0,025 м. Сферический ударник имел диаметр, равный толщине льда (1 м), материал ударника описывался как ANEOS-дунит плотностью 3317 кг/м³. Для качественного обзора косого удара было проведено несколько расчетов в плоской двумерной постановке. Скорость удара варьировалась от 60 до 500 м/с, кинетическая энергия – от 3 до 220 МДж. Механические свойства ударника описывались как два крайних слу-



**Рис. 3.** Избранные кадры пробивания льда толщиной 1 м ударником диаметром 1 м со скоростью 60 м/с. На верхнем кадре темно-серый цвет отвечает неразрушенному льду, менее серый тон – воде, и светло-серый тон внизу – скальному дну, сделанному из того же материала, что и ударник. По мере разрушения льда используется все более светлый тон. Момент времени 360 мс соответствует началу коллапса переходной полости. Через 620 мс после удара идущее вверх дно полости встречается с падающим в полость льдом. На последнем показанном кадре (1,72 с) вертикальные стрелки указывают на край «полыни» из сохранившего прочность льда. На расстоянии ~10 м от центра видны отдельные кольцевые трещины

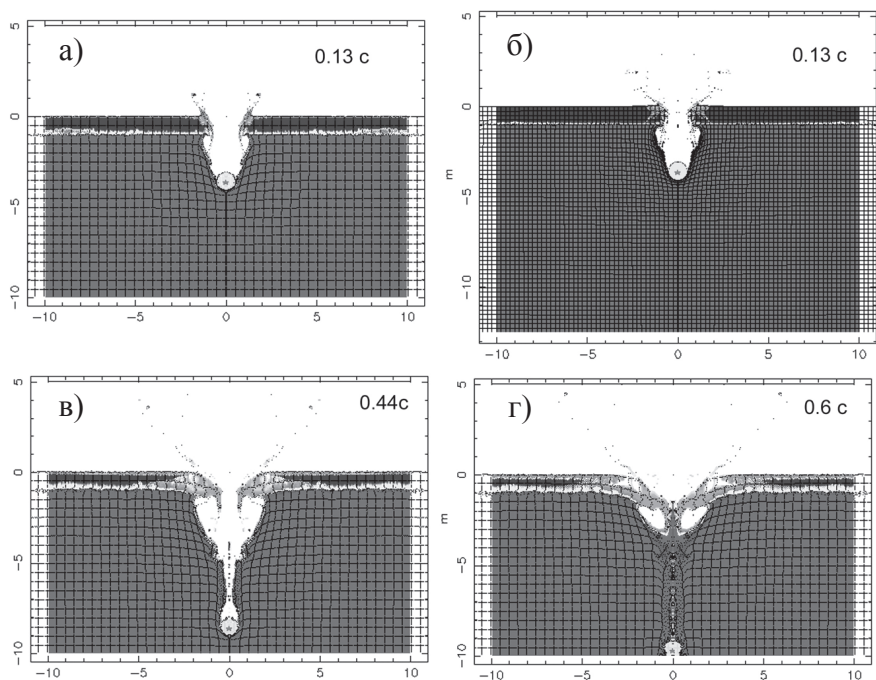
чая: (1) – сыпучая среда с сухим трением (предельно трещиноватая горная порода) и (2) – упругий шар с пределом текучести в несколько ГПа, разрушающийся только при достаточно сильном растяжении. В последнем случае ударник достигал дна водоема как одно целое и рассыпался при ударе о дно. Наличие ила на дне озера в данной работе не учитывалось в виду трудности моделирования водонасыщенной взвеси – наличие ила может помочь сохранению обломка, достигшего дна.

Общая последовательность событий при ударе со скоростью 60 м/с сферического тела с диаметром, равным толщине льда  $h_{ice}$ , показана на рис. 3. Кинетическая энергия удара составляет  $\sim 3,16$  МДж. В данном расчетном варианте ударник полагался «сильно трещиноватым», то есть сдвиговая прочность целиком определяется локальным давлением и постоянным трением. Такой ударник деформируется при пробивании льда и эффективно передает энергию в течение воды. В результате подо льдом возникает переходная полость, размеры которой ограничиваются растущей потенциальной энергией. По окончании роста дно полости вздымается вверх. Во встречном движении участвует часть ледяного покрова, разрушенного при пробивании. Падающий в полость лед встречается с движущимся вверх дном коллапсирующей полости, и процесс завершается воздыманием и опаданием центральной струи. Ко времени начала опадания струи диаметр «попыньи», окруженной льдом лишь частично потерявшим прочность, составляет около 9 м (или, в относительных единицах,  $9 h_{ice}$ ). При толщине льда в 0,7 м и диаметре ударника 0,7 м диаметр «попыньи» составил бы  $\sim 6,3$  м.

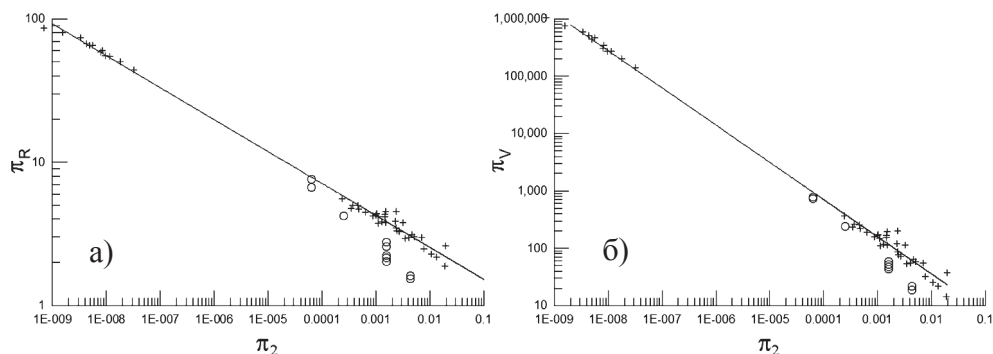
Необходимо упомянуть ряд проблем, созданных устройством программы SALEB и относительно низким пространственным разрешением (20 ячеек на толщину льда и на диаметр ударника). Программа SALEB рассчитывает двумерную осесимметричную задачу. Следовательно, в ней невозможно описать образование радиальных трещин. Поэтому при выполнении критериев разрушения в некоторой точке материал считается «разрушенным», хотя в реальности это могут быть единичные радиальные трещины [Ivanov et al., 1997a; Ivanov et al., 1997b]. Низкое пространственное разрешение вынуждается желанием отодвинуть боковые стенки «водоема» как можно дальше, чтобы снизить краевые эффекты. Проведенные расчеты с вдвое большим разрешением (40 ячеек на диаметр ударника) позволили нам рассмотреть процесс пробивания льда более детально (рис. 4, а,б), но расчет с таким разрешением требует более недели машинного времени без распараллеливания исходного кода. Эту задачу пришлось отложить на будущее.

Пробивание льда «твердым» ударником качественно похоже на картину, показанную на рис. 3, с тем отличием, что после проникания ударник продолжает тормозиться в воде, оставляя за собой открытый канал. Здесь коллапс переходной полости начинается с закрытия канала (рис. 4, а,в,д). В классической гидродинамике схлопывание канала за телом, тормозящимся в воде, порождает струю, называемую струей Ворthingтона (Worthington jet). В маломасштабных классических экспериментах [Mallock, 1918] эффект гравитационного коллапса водяной полости существенно осложняется поверхностным натяжением. В численных расчетах масштаба Чебаркульского удара поверхностное натяжение незначительно, что несколько меняет картину коллапса.

Эффективность образования полости в воде подо льдом можно оценить сравнением с известными результатами по удару в воду [Schmidt and Housen, 1987]. Эти данные собраны из двух групп экспериментов – удар твердых снарядов со скоростью до 2 км/с и падение капель в воду со скоростями в несколько метров в секунду.



**Рис. 4.** Пробивание льда прочным ударником. Оттенки серого имеют то же значение, что и на рис. 3. Верхняя пара рисунков сравнивает момент времени 0,13 с для вариантов с пространственным разрешением 20 (а) и 40 (б) ячеек на диаметр ударника. Рисунки (в) и (г) показывают схлопывание следа ударника в воде (в) и коллапс полости в воде при встрече центральной восходящей струи с падающим в полость льдом (г) (сравните с рис. 3, 620 мс)



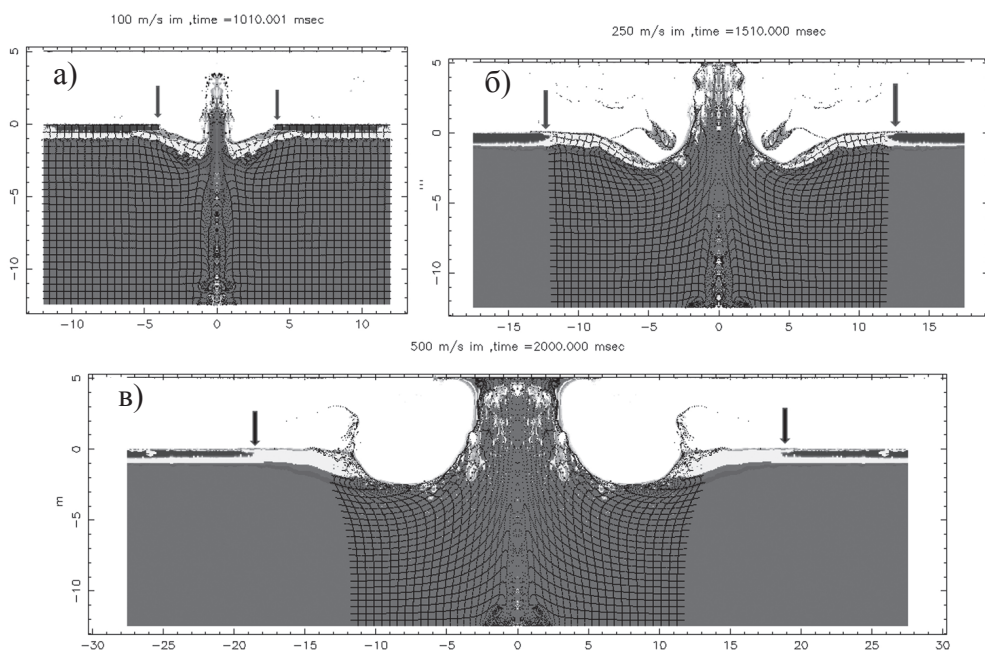
**Рис. 5.** Эффективности ударов в чистую воду (кресты) и модельных ударов через лед (кружки) сближаются с ростом скорости удара (уменьшение  $\pi_2$ )

ду. Данные о размерах полостей доступны в базе данных К. Holsapple<sup>1</sup>. На рис. 5 результаты расчетов сравниваются с базой данных в приведенных параметрах [Holsapple and Housen, 2007]:  $\pi_2 = g \times m^{1/3} / U^2$ ,  $\pi_V = V^*(\rho/m)$ ,  $\pi_R = R^*(\rho/m)^{1/3}$ , где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $m$  – масса ударника,  $U$  – скорость удара,  $V$  – максималь-

<sup>1</sup> <http://keith.aa.washington.edu/craterdata/> (проверено 30 марта 2014 г.)

ный объем полости в воде ниже уровня исходной поверхности,  $\rho$  – плотность воды и  $R$  – максимальный радиус полости в момент максимума объема.

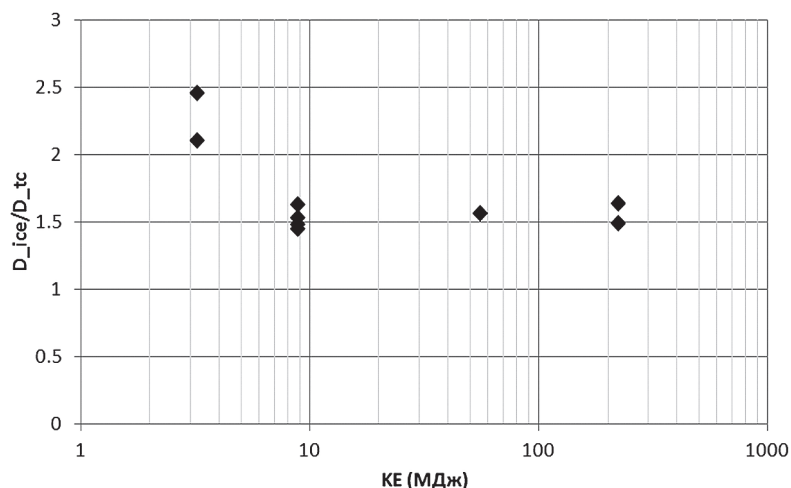
Как видно на рис. 5 удары с наименьшей кинетической энергией (большие величины  $\pi_2$ ) заметно менее эффективны, чем удары в чистую воду. Это, конечно, связано с потерей энергии ударника, затраченной на пробивание льда. С ростом кинетической энергии (уменьшение  $\pi_2$ ) эффективность образования полости в воде подо льдом приближается к эффективности удара в воду. При этом становится заметным влияние дна. Еще на стадии роста полости лед разрушается на значительных радиальных расстояниях от точки удара (рис. 6). К сожалению, двумерность расчетов не позволяет оценить состояние льда в зоне разрушения – это разрушение в реальности может выражаться в появлении достаточно редких радиальных трещин.



**Рис. 6.** Влияние скорости удара на размер полыньи при ударе со скоростями 100 (а), 250 (б), и 500 м/с (в) для ударника с диаметром равном толщине льда (1 м в расчетах) при глубине водоема 12,5 м. Радиальный размер водоема 55 м. Стрелками отмечена граница неразрушенного льда

Хотя полное параметрическое исследование задачи требует гораздо большего объема расчетов, из уже накопленного материала можно сделать некоторые предварительные выводы. На рис. 1 в сравнении с данными о подледных взрывах ВВ данные проведенного моделирования дают похожие соотношения размера полыньи во льду и энергии взрыва. Из первых результатов можно заметить сложную связь между максимальным диаметром полости в воде подо льдом и размера полыньи. Как показано на рис. 7, для наименьших значений кинетической энергии диаметр полыньи составляет 2–2,5 диаметра полости в момент достижения ее максимального объема. В рамках исследованных параметров это случай ударника с диаметром, равным толщине льда при скорости удара 60 м/с. При скорости удара 100 м/с и выше (кинетическая энергия более 10 МДж) это отношение остается примерно постоянным и составляет 1,5–1,6. Вместе с условиями подобия, проиллюстриро-

ванными на рис. 5, эти результаты позволяют (при некоторой детализации) построить довольно общую схему оценки образования полыньи на тонком льду при ударе.



**Рис. 7.** Отношение диаметра полыньи, по границе частично разрушенного льда, к диаметру переходной полости (в момент достижения максимального объема полости) в зависимости от энергии удара

## Заключение

Предварительное моделирование удара в лед в условиях, близких к падению Чебаркульского фрагмента, показало, что для возникновения полыньи диаметром 6–8 м во льду толщиной 70 см необходимо взрывное или ударное воздействие с энергией 3–10 МДж. По первым прикидкам представляется, что удар несколько эффективнее подледного взрыва (рис. 1). Поскольку основной массив расчетов в модели делался для метеороида с поперечником, равным толщине льда, из полученных результатов легко получить ограничения на гипотезу о том, что найденный обломок массой около 600 кг и образовал полынью – при плотности 3300 кг/м<sup>3</sup> диаметр эквивалентной сферы составит как раз около 70 см, что близко к сообщаемой толщине льда на озере в день падения. При скорости 60–100 м/с, должна была образоваться полынья диаметром около 6–7 м. При наиболее вероятной скорости 250 м/с [Ророва et al., 2013], размер полыньи должен быть больше. В то же время при ограниченной точности модели нельзя исключить, что Чебаркульский фрагмент был больше по массе, и другие его фрагменты могут быть найдены на дне озера. Трудно дать количественную оценку, но удвоение начальной массы относительно извлеченного обломка не представляется невероятным.

Наиболее серьезным расхождением с доступными наблюдениями нужно признать наличие чистой воды на всех фотографиях полыньи, включая спутниковые снимки высокого разрешения. На фотографиях «кратеров» во льду, образованных взрывами [Billings et al., 2003] битый лед плавает в полынье. Из наших расчетов вертикального удара тоже следует наличие битого льда в полынье. Проблему можно анализировать с различных точек зрения: (1) – рыбаки очистили полынью; (2) – сильный ветер сдул часть султана (на видеорегистрации удара виден снос облака снега по ветру); (3) – наклонный удар привел к несимметричному коллапсу

полости и движению султана в направлении движения ударника. Причины (2) и (3) могли быть скомбинированы. Несимметричный коллапс при косом ударе астероидов хорошо известен из работ по трехмерному моделированию образования кратеров в земной коре, но аналогичные расчеты для озерного льда еще предстоит провести. Наши попытки качественного анализа косого удара в плоской постановке дают основания продолжить анализ, однако ограниченный объем статьи вынуждает нас отложить дискуссию.

## Литература

*Иванов, Б.А.* Численное моделирование крупнейших земных метеоритных кратеров // Астрон. вестн, 39, с. 381–409, 2005.

*Саков, Г.П., М.П. Цивилев, Поляков И.С.* Обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций: учебник в 3-х частях: Часть 2. Инженерное обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций: в 3-х книгах: книга 1. Способы и средства инженерного обеспечения ликвидации чрезвычайных ситуаций / Под общ. ред. С.К. Шойгу/ 404 с. ЗАО «ПАПИРУС», Москва, 1998.

*Amsden, A.A., H.M. Ruppel, and C.W. Hirt*, SALE: A simplified ALE Computer Program for Fluid Flow at All Speeds // Los Alamos Laboratory Report LA-8095, pp. 101, Los Alamos, NM, 1980.

*Artemieva, N.A., and V.V. Shuvalov*, Motion of a fragmented meteoroid through the planetary atmosphere // Journal of Geophysical Research, 106, 3297–3310, 2001.

*Benz, W., A.G.W. Cameron, and H.J. Melosh*, The origin of the Moon and the single-impact hypothesis III // Icarus, 81 (1), 113–131, 1989.

*Billings, S.E., S.A. Kattenhorn, and E. Stansbery*, Comparison Between Terrestrial Explosion Crater Morphology in Floating Ice and European Chaos, in Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, edited by S. Mackwell, pp. 1955, 2003.

*Borovicka, J., P. Spurny, P. Brown, P. Wiegert, P. Kalenda, D. Clark, and L. Shrubny*, The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature, 503, 235–237, 2013.

*Collins, G.S., H.J. Melosh, and B.A. Ivanov*, Modeling damage and deformation in impact simulations // Meteoritics & Planetary Science, 39 (2), 217–231, 2004.

*Galimov, E.M.*, Chelyabinsk meteorite: an LL5 chondrite // Solar System Research, 47, 255–259, 2013.

*Hoerner, S.F.* Fluid-Dynamic Drag. Hoerner Fluid Dynamics // Second Edition, 455 pp., 1965.

*Holsapple, K.A., and K.R. Housen*, A crater and its ejecta: An interpretation of Deep Impact // Icarus, 187, 345–356, 2007.

*Ivanov, B.A.*, Shock melting of permafrost on Mars: Water ice multiphase equation of state for numerical modeling and its testing // Lunar and Planetary Conference, #1232, 2005.

*Ivanov, B.A., A.T. Basilevsky, and G. Neukum*, Atmospheric entry of large meteoroids: implication to Titan // Planetary and Space Science, 45, 993–1007, 1997a.

*Ivanov, B.A., D. Deniem, and G. Neukum*, Implementation of dynamic strength models into 2D hydrocodes: Applications for atmospheric breakup and impact cratering // International Journal of Impact Engineering, Hypervelocity Impact Proceedings of the 1996 Symposium, 20 (1–5), 411–430, 1997b.

*Ivanov, B.A., H.J. Melosh, A.S. McEwen, and Hirise\_Team*, Small Impact Crater Clusters in High Resolution HiRISE Images – II // Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, pp. 1410, 2009.

*Ivanov, B.A., H.J. Melosh, and E. Pierazzo*, Basin-forming impacts: Reconnaissance modeling, in GSA Special Papers 465, edited by R.L. Gibson, and W.U. Reimold, pp. 29–49, Geological Society of America, Boulder, Colorado, USA, 2010.

*Ivanov, B.A., and E. Pierazzo*, Ice-rock mixture behavior in full scale impact crater modeling, in 7th Int. Conf. on Mars, LPI Contrib 1353, pp. #3236 (<http://www.lpi.usra.edu/meetings/7thmars2007/pdf/3236.pdf>), LPI, Houston TX, 2007.

*Ivanov, B.A., and E. Pierazzo*, Impact cratering in H<sub>2</sub>O-bearing targets on Mars: Thermal field under craters as starting conditions for hydrothermal activity // *Meteoritics and Planetary Science*, 46, 601–619, 2011.

*Mallock, A.*, Sounds Produced by Drops Falling on Water // *Royal Society of London Proceedings Series A*, 95, 138–143, 1918.

*Mellor, M.*, Derivation of guidelines for blasting floating ice // *Cold Regions Science and Technology*, 13 (2), 193–206, 1987.

*Oberbeck, V.R.*, Laboratory simulation of impact cratering with high explosives // *J. Geophys. Res.*, 76 (23), 5732–5749, 1971.

*Popova, O.P., P. Jenniskens, V. Emel'yanenko, A. Kartashova, E. Biryukov, S. Khaibrahmanov, V. Shuvalov, Y. Rybnov, A. Dudorov, V.I. Grokhovsky, D.D. Badyukov, Q.-Z. Yin, P.S. Gural, J. Albers, M. Granvik, L.G. Evers, J. Kuiper, V. Kharlamov, A. Solovyov, Y.S. Rusakov, S. Korotkiy, I. Serdyuk, A.V. Korochantsev, M.Y. Larionov, D. Glazachev, A.E. Mayer, G. Gisler, S.V. Gladkovsky, J. Wimpenny, M.E. Sanborn, A. Yamakawa, K.L. Verosub, D.J. Rowland, S. Roeske, N.W. Botto, J.M. Friedrich, M.E. Zolensky, L. Le, D. Ross, K. Ziegler, T. Nakamura, I. Ahn, J.I. Lee, Q. Zhou, X.-H. Li, Q.-L. Li, Y. Liu, G.-Q. Tang, T. Hiroi, D. Sears, I.A. Weinstein, A.S. Vokhmintsev, A.V. Ishchenko, P. Schmitt-Kopplin, N. Hertkorn, K. Nagao, M.K. Haba, M. Komatsu, T. Mikouchi, and t.C.A. Consortium*, Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // *Science*, 342 (6162), 1069–1073, 2013.

*Schmidt, R.M., and K.R. Housen*, Some recent advances in the scaling of impact and explosion cratering // *Int. J. Impact Engng.*, 5, 543–560, 1987.

*Thompson, S.L., and H.S. Lauson*, Improvements in the Chart-D radiation hydrodynamic code III: Revised analytical equation of state, pp. SC-RR-71 0714, 119 pp., Sandia Laboratories, Albuquerque, NM, 1972.

*Van der Kley, I.F.*, The use of explosives for clearing ice, in Rijkswaterstaat Communication Nr. 7, pp. 56, The Hague, Netherlands, 1965.

*White, K.D., and R.L. Kay*, Ice Jam Flooding and Mitigation: Lower Platte River Basin, Nebraska, in Special Report 96-1, pp. 83, US Army Corps of Engineers, CRREL, Hanover, New Hampshire, 1996.