

УДК 523.6

## ВЫБРОС ВЕЩЕСТВА В АТМОСФЕРУ ПРИ ПАДЕНИИ ДЕСЯТИКИЛОМЕТРОВЫХ АСТЕРОИДОВ В ОКЕАН

© 2021 г. В. В. Шувалов\*

*Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия*

*\*E-mail: valeryvhuvalov@gmail.com*

Поступила в редакцию 16.07.2020 г.

После доработки 04.09.2020 г.

Принята к публикации 18.09.2020 г.

Приведены результаты численного моделирования вертикального падения десятикилометровых астероидов на твердую поверхность и в океан глубиной от 1 до 7 км. В расчетах получены максимальные массы, выброшенных в атмосферу воды и грунта, а также массы воды и грунта, оставшиеся в атмосфере через 30 мин после удара. Делается вывод, что при падении астероидов размером порядка десяти километров в океан воздействие на атмосферу Земли будет, по-видимому, не менее сильным, чем при падении астероидов на сушу.

**Ключевые слова:** астероидная опасность, численное моделирование, кратер, атмосферные возмущения

**DOI:** 10.31857/S0320930X21010072

### ВВЕДЕНИЕ

Идея о том, что удары космических тел могут заметно влиять на эволюцию биосферы и, в частности, могут быть причиной массовых вымираний стала очень популярной после выхода работы (Alvarez и др., 1980). В этой и последующих статьях авторы показали, что удар космического тела размером порядка 10 км мог быть причиной массового вымирания биоты на границе мел-палеоген 66 млн лет назад. Вскоре был обнаружен и кратер Чиксулуб (Hildebrand и др., 1991), который был образован этим ударом. Вслед за этим начались поиски других кратеров, образование которых можно было бы связать с другими массовыми вымираниями. Однако до сих пор эти поиски не увенчались успехом, и вымирание на границе мела и палеогена остается единственным, которое можно уверенно связать с ударом космического тела (см., например, Racki, 2012). Тем не менее ударная гипотеза по-прежнему видится весьма перспективной. Во-первых, более двух третей Земли покрыто океаном, а подводные кратеры не только плохо изучены, но и большей частью просто еще не обнаружены. Во-вторых, даже в тех случаях, когда удары не были единственной и основной причиной массовых вымираний, они могли быть триггерными эффектами, запускающими или усиливающими другие механизмы (Feulner, 2011). В связи с этим интересно рассмот-

реть подробнее падения крупных космических тел в океан. Основные механизмы, которые могут приводить к гибели живых организмов при ударе (см., например, Claeys, 2007; Kring, 2007; Rampino, 2020) в большой степени определяются выбросом вещества в атмосферу в процессе кратерообразования и могут зависеть от структуры мишени (химического состава грунта и наличия воды). При ударе в океан наличие слоя воды толщиной в несколько километров может заметно повлиять на выбросы грунта в атмосферу. Кроме того, в атмосферу выбрасывается много воды, которая сама и содержащиеся в ней соли могут заметно повлиять на химию атмосферы и радиационный баланс. Цель данной работы оценить с помощью численных экспериментов, как глубина океана влияет на выбросы вещества в атмосферу.

Первые расчеты ударов крупных (10–30 км) астероидов в океан глубиной 5 км были проведены еще в прошлом веке (Ahrens, O’Keefe, 1987). Выброс воды при ударах небольших (километр и менее) тел рассматривался в работах (Шувалов, Трубецкая, 2007; Robertson, Gisler, 2019). В недавней работе (Koeberl, Ivanov, 2019) рассматривались выбросы воды в атмосферу при ударе пяти- и десятикилометровых астероидов в океан глубиной 1 и 3 км. Однако в этой работе не рассматривались выбросы грунта и расчеты заканчивались через 6 мин после удара, до того, как сформировалось более или менее стационарное облако выбросов на вы-

сотах от нескольких десятков до нескольких сотен км. Цель данного исследования учесть выбросы вещества мишени и продолжить расчеты до момента зависания облака выбросов.

В первой части статьи описывается постановка задачи и методы, используемые при ее решении; во второй — результаты расчета падения десятикилометровых астероидов в океан разной глубины; в третьей части приведены основные выводы, обсуждаются использованные приближения и оставшиеся невыясненными вопросы.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для оценки выброса воды и грунта в атмосферу было проведено численное моделирование вертикальных ударов сферических каменных астероидов диаметром 10 км по мишени состоящей из кварца или дунита (моделирующих твердую поверхность), покрытых слоем воды глубиной от 1 до 7 км. Астероиды также считались состоящими из кварца или дунита. В одном из вариантов рассматривался удар десятикилометровой ледяной кометы. Скорость ударников принималась равной 20 км/с. Для того, чтобы учесть влияние атмосферного следа, образующегося при пролете астероида через атмосферу, расчеты начинались в момент, когда астероид находился на высоте 100 км над уровнем моря.

Расчеты проводились с помощью программного комплекса COVA (Shuvalov, 1999), который неоднократно применялся для моделирования ударных явлений, в том числе падений астероидов в море (см., например, Shuvalov, Dyrvik, 2004). В расчетах явно выделялись границы между веществами, описываемыми разными уравнениями состояния (в данном случае вода, воздух и грунт). Размер расчетной сетки  $2000 \times 2000$  ячеек. Начальный размер ячейки 125 м (80 точек на диаметр ударника), по мере разлета атмосферного плюма, образующегося при ударе, и увеличения возмущенной области ячейки удваивались, на заключительной стадии расчетов расчетная сетка была неравномерной, ячейки увеличивались по мере удаления от эпицентра удара. Максимальный размер расчетной области составлял  $6000 \times 6000$  км.

Для описания термодинамических свойств воздуха использовалось табличное уравнение состояния (Кузнецов, 1965). Для описания термодинамики воды, кварца и дунита использовались табличные уравнения состояния, полученные по программе ANEOS (Thomson, Lauson, 1972) с начальными данными для дунита (Potter и др., 2013) и кварца (Melosh, 2007). Распределение плотности и давления воздуха по высоте в равновесной

атмосфере Земли задавалось согласно модели CI-RA (COSPAR International Reference Atmosphere, <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/atmospheric/cira/cira86/>).

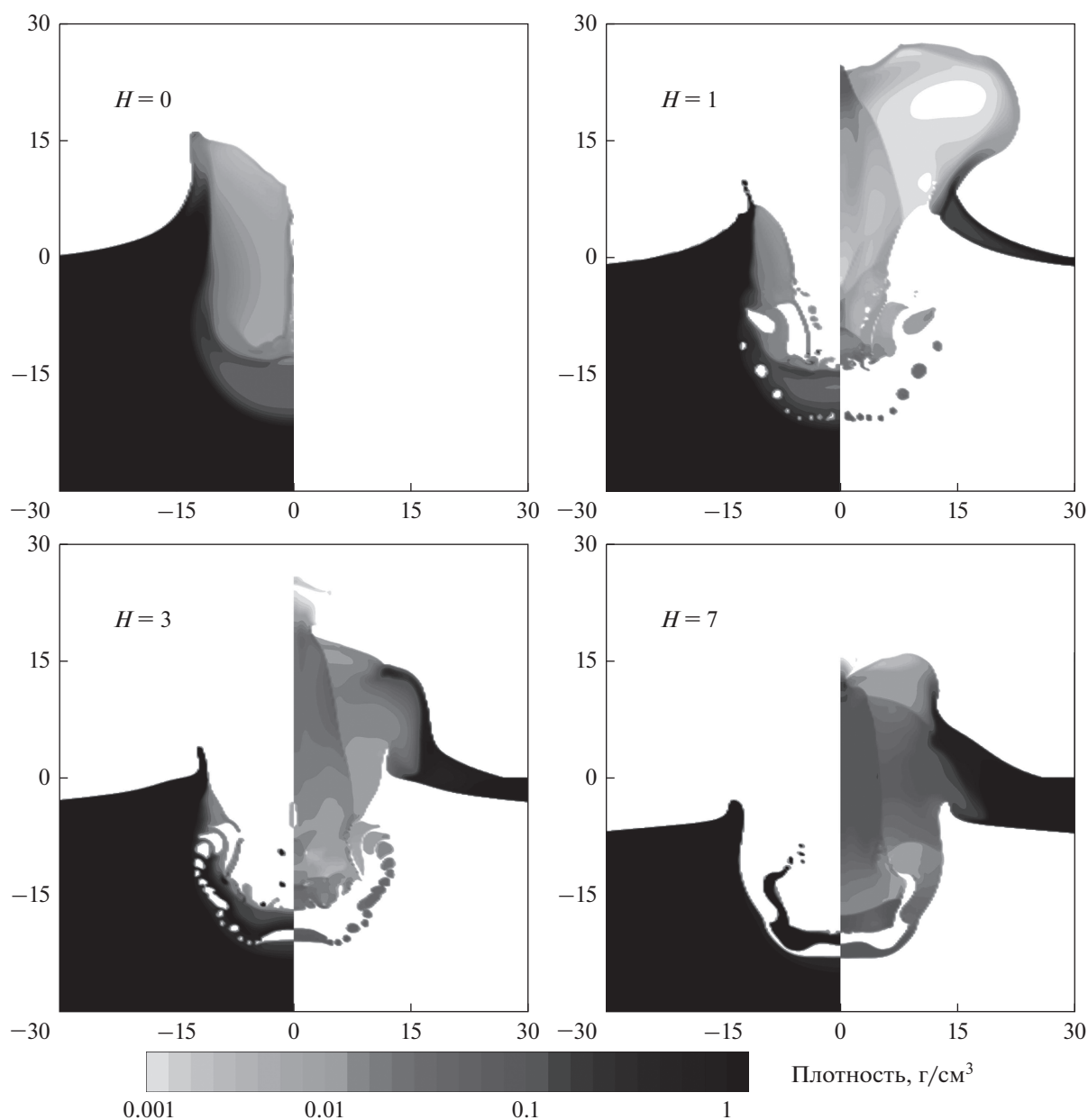
Газодинамическое приближение работает до высот порядка 400 км, выше пробег частиц становится больше характеристической высоты атмосферы. Учитывая это, в качестве граничных условий на верхней границе расчетной сетки использовалась процедура, описанная в работе (Шувалов и Хазинс, 2018). Уравнения газовой динамики решались и на высотах более 400 км, при этом периодически (в данном случае один раз за 50 расчетных слоев) область, где плотность газа меньше, чем равновесная плотность на высоте 400 км, заполнялась фоновыми значениями плотности и давления и нулевыми скоростями. Такие граничные условия не влияют на течение на высотах до 200–300 км, обеспечивают максимально большой временной шаг и позволяют аккуратно описывать атмосферный плюм, который поднимается на высоты в тысячи километров.

При расчете кратерообразования учитывалась прочность грунта по модели Кулона–Мора и акустическая флюидизация (Wunnemann, Ivanov, 2003).

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 1 показана самая начальная стадия (через 5 с после начального контакта ударника, состоящего из кварца, с твердой (кварцевой) или жидкой поверхностью) падения десятикилометрового астероида на сушу и в океан глубиной 1, 3 и 7 км.

Классическая картина кратерообразования в однородной мишени при невысоких скоростях (порядка 1 км/с и ниже) описывается зет-моделью (Иванов, 1979). Согласно этой модели вещество мишени в момент удара приобретает скорость, направленную по радиусам (перпендикулярную фронту ударной волны), расходящимся из точки первоначального контакта. Эта скорость уменьшается со временем из-за того, что давление газа в образующейся полости (кратере) меньше давления за фронтом ударной волны, распространяющейся в мишени. Одновременно появляется скорость в перпендикулярном радиусу направлении из-за наличия свободной поверхности на границе мишени и воздуха, в котором давление равно атмосферному. Вещество ударника растекается по поверхности растущего кратера. При больших скоростях удара (десятки км/с) часть вещества мишени и ударника полностью или частично испаряется, испаренная масса разлетается с поверхности растущего кратера и ударника в его центр, что хорошо видно на рис. 1. При наличии воды



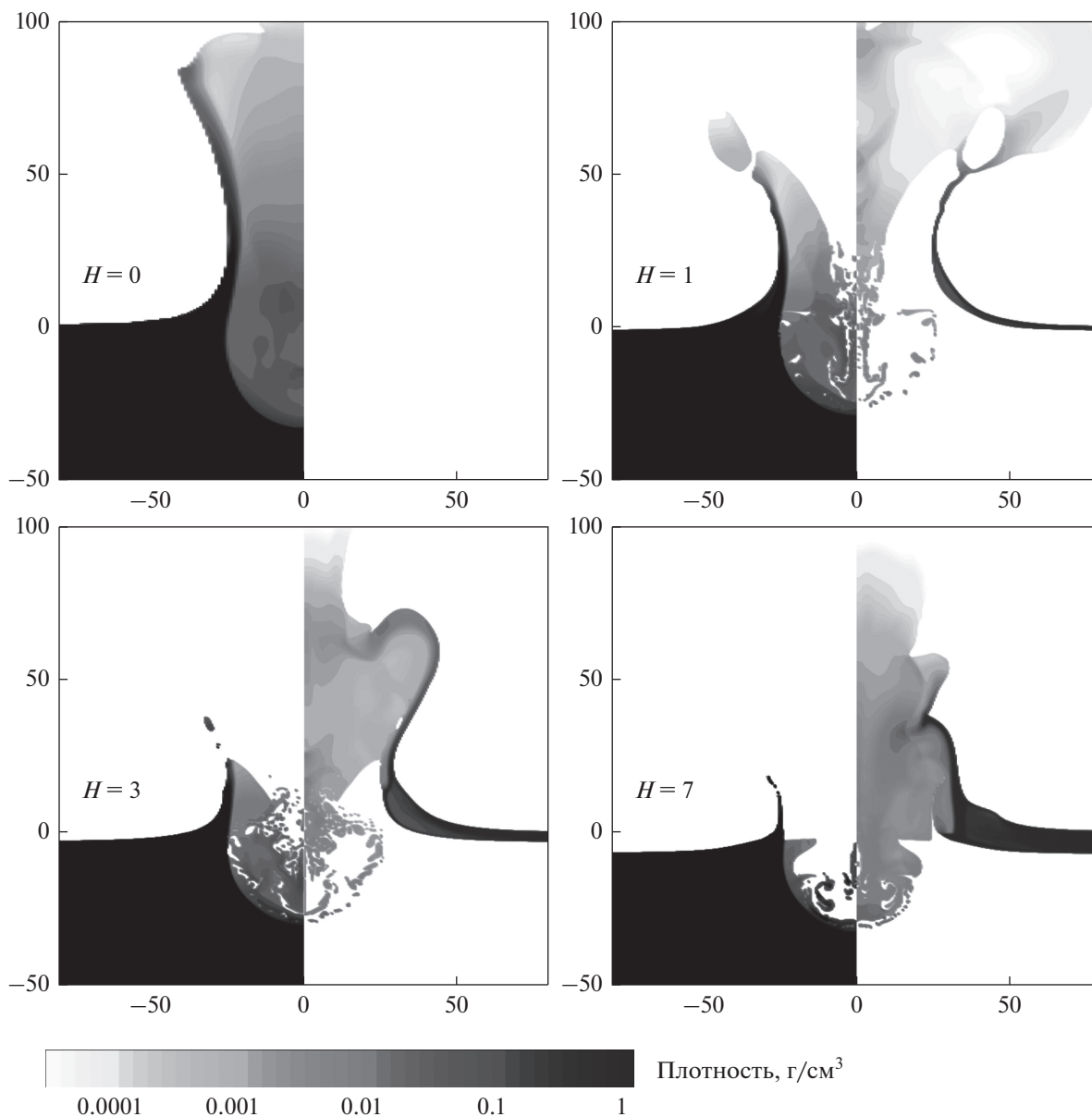
**Рис. 1.** Распределения плотности воды (справа) и вещества грунта и ударника (слева) в  $\text{г/см}^3$  через 5 с после вертикального падения десятикилометрового астероида на твердую поверхность ( $H=0$ ) и в океан глубиной  $H$ , равной 1, 3 и 7 км. Все расстояния измерены в км.

картина становится сложнее. В случае глубины океана 3 и 7 км почти вся внутренность кратера заполняется парами воды, при глубине океана 1 км внутри кратера разлетаются и пары воды, и пары грунта и ударника.

Вблизи оси симметрии потоки испаренного вещества сталкиваются, образуя струю паров, направленную вверх. В результате при падении астероида на сушу формируется атмосферный плум, состоящий из плотного (в основном конденсированного) вещества, выбрасываемого за счет класси-

ческого кратерообразующего течения с краев кратера (конуса выбросов), и горячая разреженная струя пара внутри конуса выбросов (см. рис. 2).

При малых скоростях ударника (порядка скорости звука в грунте или меньших) выбросы разлетаются под углом примерно  $45^\circ$ . При скоростях в десятки км в с угол значительно больше, особенно в начальные моменты времени. Это объясняется сильной сжимаемостью грунта при скоростях, больших скорости звука в мишени, и тем,



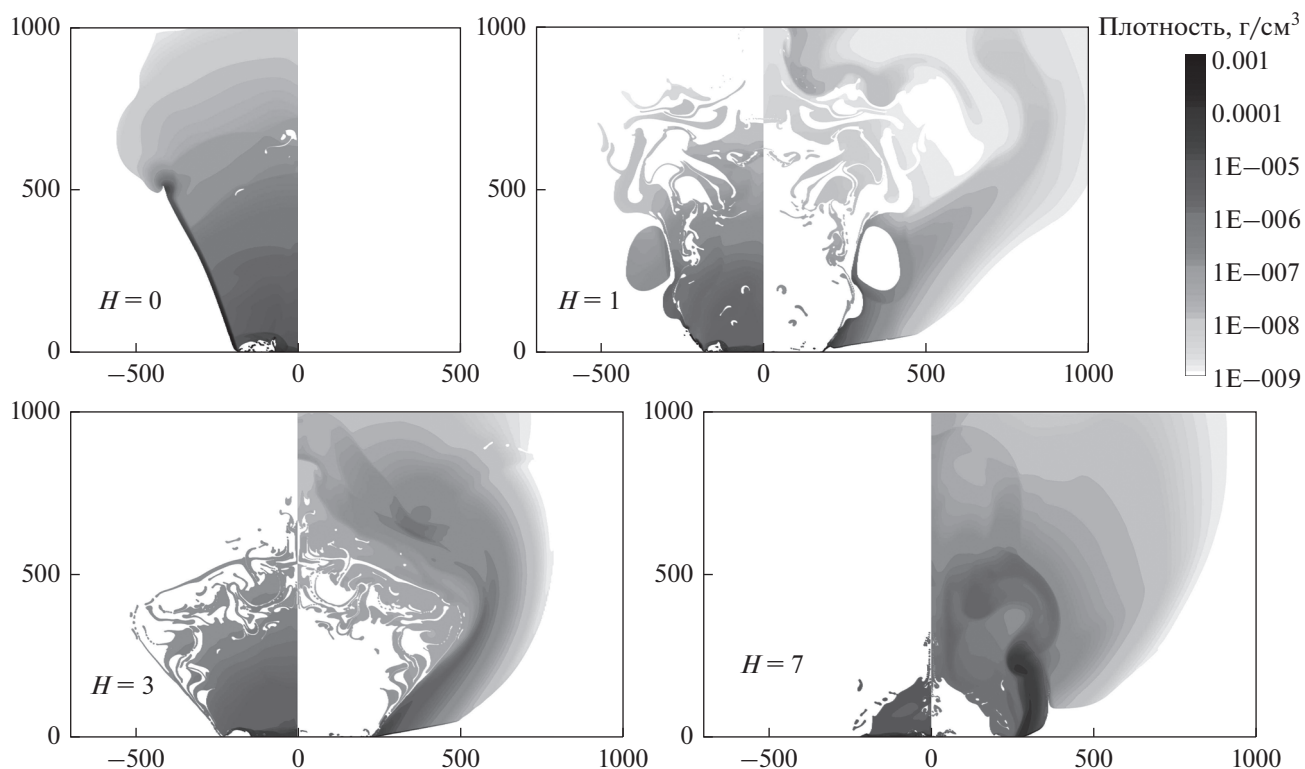
**Рис. 2.** Распределения плотности воды (справа) и вещества грунта и ударника (слева) в г/см<sup>3</sup> через 30 с после вертикального падения десятикилометрового астероида на твердую поверхность ( $H = 0$ ) и в океан глубиной  $H$ , равной 1, 3 и 7 км. Все расстояния измерены в км.

что значительная масса мишени плавится и не имеет прочности.

При падении астероида в океан картина течения более сложная. При глубине океана  $H = 7$  км в начале образуются два кратера: водяной и внутри него меньший (из-за большей плотности и прочности грунта) в грунте. Центральная струя плюма состоит только из паров воды. При меньших глубинах наблюдается промежуточная картина течения. Центральная струя состоит из паров и воды, и грунта, и ударника. Выброс воды обусловлен сначала распространением ударной

волны в океане при движении в нем ударника, потом вода выбрасывается вылетающим из донного кратера грунтом. Вода испаряется значительно легче (при меньших температурах), чем грунт, поэтому даже при глубине океана 1 км (в 10 раз меньше диаметра ударника) облако водяных паров больше по объему облака паров грунта и ударника.

Через 5 мин после удара во всех случаях атмосферный плюм поднимается на высоты выше 1000 км. С увеличением глубины океана объем облака, содержащего пары и частицы грунта и



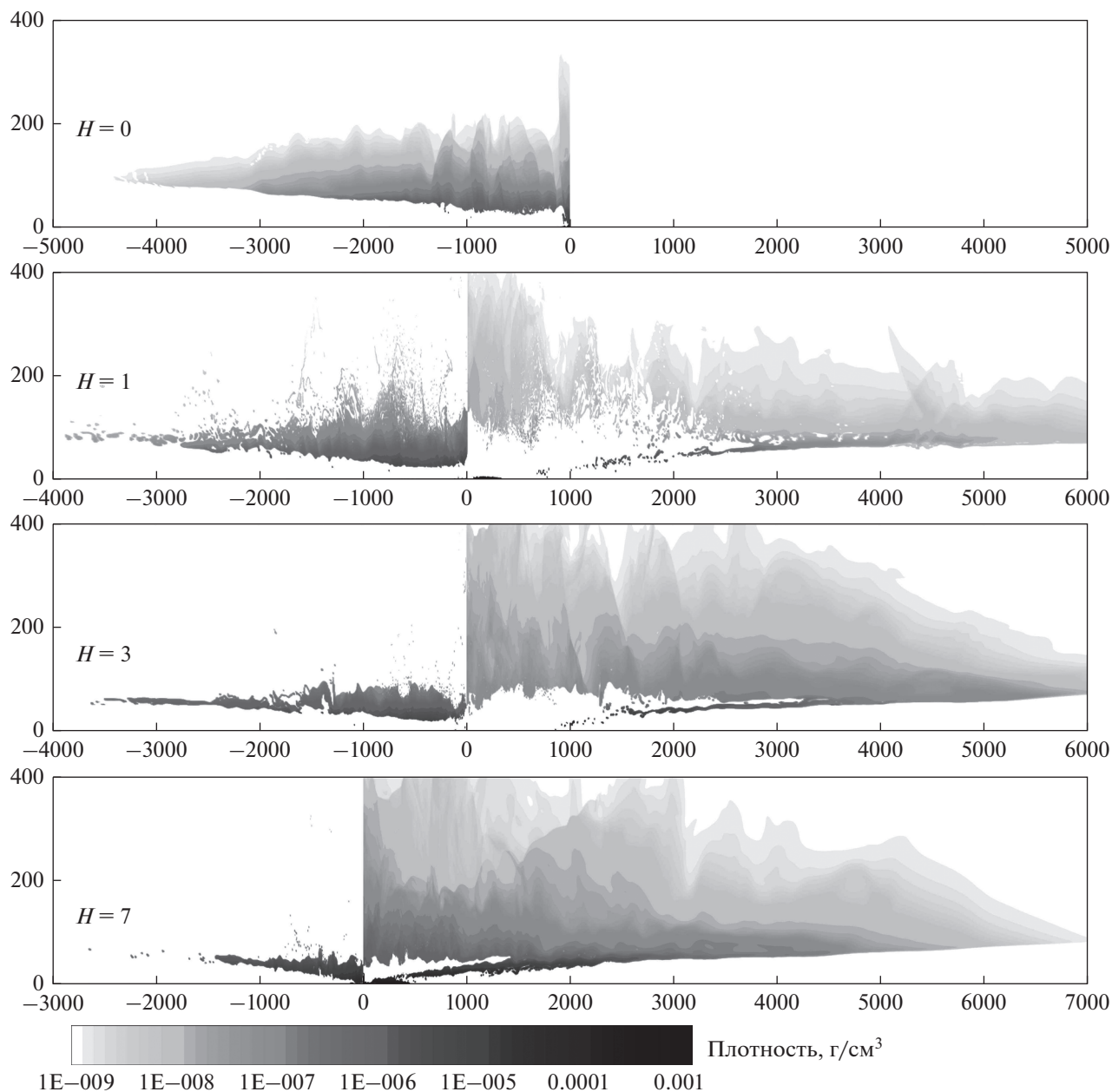
**Рис. 3.** Распределения плотности воды (справа) и вещества грунта и ударника (слева) в  $\text{г/см}^3$  через 5 мин после вертикального падения десятикилометрового астероида на твердую поверхность ( $H = 0$ ) и в океан глубиной  $H$ , равной 1, 3 и 7 км. Все расстояния измерены в км.

ударника, и высота его подъема немного уменьшаются. При этом облако из вещества грунта и ударника находится внутри водяного облака. В этот момент верхняя часть плюма продолжает подниматься вверх, а нижняя, вылетевшая из кратера позже и с меньшей скоростью, опускается вниз под действием силы тяжести.

Плотное конденсированное вещество из конуса выбросов осаждается на поверхность океана (или суши при  $H = 0$ ), а разреженные частично конденсированные пары тормозятся в плотных слоях атмосферы и через 30 мин формируют облако паров и мелких конденсированных частиц воды, грунта и ударника размером в несколько тысяч километров (см. рис. 4). Размер облака из вещества ударника и грунта заметно уменьшается с увеличением глубины океана, а размер водяного облака остается примерно одинаковым. Температура вещества грунта и ударника в этот момент разная в разных частях плюма, максимальная близка к температуре конденсации. Про размер частиц (как образовавшихся при дроблении грунта, так и при конденсации) данные расчеты не дают информации, так как вещество рассматривалось как сплошная среда, термодинамические свойства

которой описываются уравнением состояния. Конденсация паров детально рассматривалась в работах (Johnson, Melosh, 2012; Svetsov, Shuvalov, 2016). В частности было показано, что более мелкие частицы образуются во внешней, самой высокоскоростной части плюма, более крупные — внутри. Характерный размер частиц при диаметре астероида 10 км и скорости 21 км/с составляет 250  $\mu\text{м}$ .

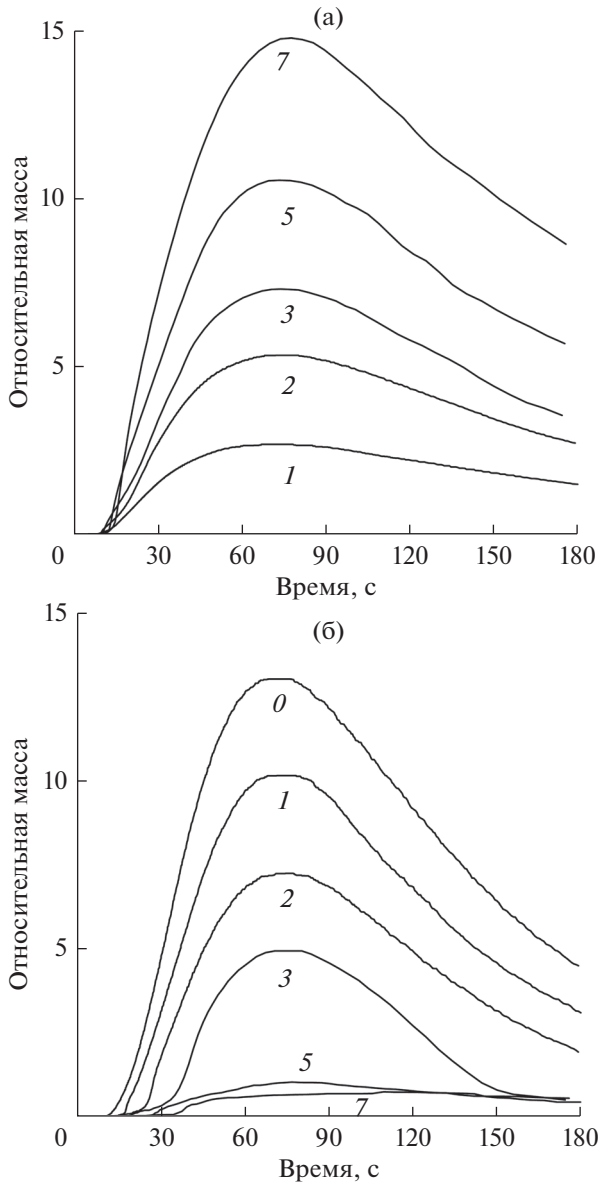
На рис. 5 показаны зависимости от времени масс воды и суммарной массы ударника и грунта в атмосфере на высотах более 16 км для всех рассмотренных глубин океана. Используемая методика не позволяет использовать более трех разных материалов, поэтому грунт и ударник состоят из одинакового материала и их нельзя разделить. Значение 16 км выбрано как характерное значение высоты современной тропопаузы, т.е. рассматривалась масса вещества, выброшенного в современную стратосферу и выше. Во всех случаях максимальная масса выбросов воды и грунта в атмосфере достигается в моменты времени 70–80 с, потом она падает из-за осадения в поле тяжести. Зависимость от глубины океана выглядит вполне естественной: масса выброшенного грунта с увеличением глубины уменьшается, масса воды —



**Рис. 4.** Распределения плотности воды (справа) и вещества грунта и ударника (слева) в  $\text{г/см}^3$  через 30 мин после вертикального падения десятикилометрового астероида на твердую поверхность ( $H = 0$ ) и в океан глубиной  $H$ , равной 1, 3 и 7 км. Все расстояния измерены в км.

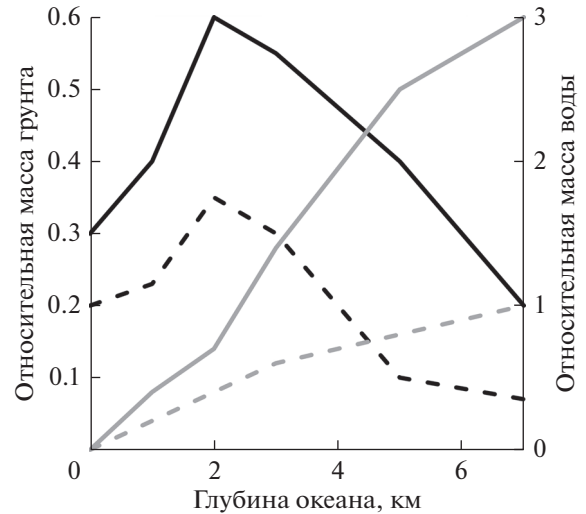
увеличивается. Максимальная масса выброшенной воды примерно на 10% больше, чем в расчетах (Koeberl, Ivanov, 2019), что объясняется несколько большей скоростью удара (20 км/с вместо 18 км/с). Суммарная масса выбросов (грунт + вода + ударник) во всех вариантах остается примерно одинаковой. При средней глубине океана 3–4 км масса выброшенного грунта в три раза меньше, чем при падении астероида на сушу.

В течение времени 5–10 мин основная часть выброшенных воды и грунта выпадает на поверхность под действием силы тяжести. В основном падает большей частью конденсированное вещество из конуса выбросов. Центральная часть плюма, состоящая в основном из первоначально частично или полностью испаренного вещества, тоже опускается и частично тормозится на высотах порядка 100 км. При торможении вещество нагревается и может снова частично испаряться. Рис. 6



**Рис. 5.** Зависимости от времени массы воды (а) и суммарной массы грунта и ударника (б) в атмосфере на высотах более 16 км. Массы измеряются в массах падающего астероида. Значения глубины океана в км указаны около каждой кривой.

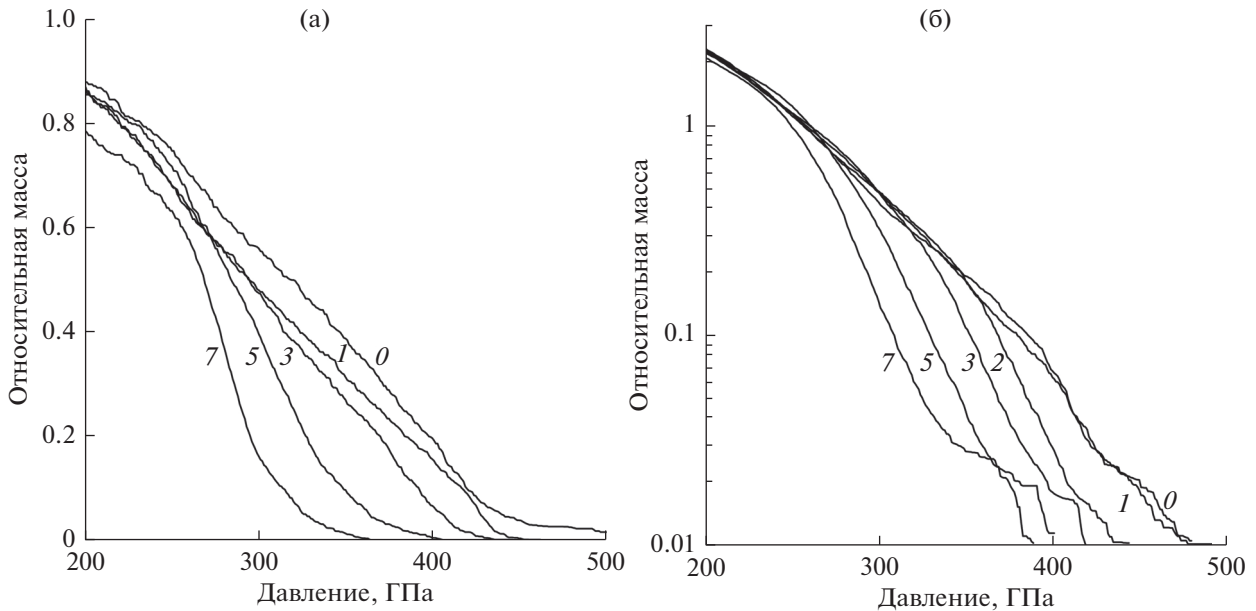
демонстрирует содержание воды и вещества грунта и ударника в атмосфере в момент времени 30 мин, после падения плюма в поле тяжести и торможения в верхних слоях атмосферы. Содержание воды в стратосфере и мезосфере (на высотах более 50 км) ведет себя очевидным образом. Чем больше глубина океана, тем больше воды выбрасывается и больше остается после падения плюма. А вот содержание вещества грунта и ударника на стратосферных и мезосферных высотах и выше при глубинах океана 1–5 км оказывается



**Рис. 6.** Зависимости от глубины океана массы воды (серая кривая) и вещества грунта и ударника (черная кривая) в атмосфере на высоте более 16 км (сплошные кривые) и 50 км (пунктирные кривые) через 30 мин после удара.

даже больше, чем при падении астероида на сушу. Объясняется это, по-видимому, тем, что вещество грунта окружено облаком водяного пара и перемешивается с ним. При ударе о твердую поверхность частично или полностью испаренное вещество ударника и грунта перемешивается с холодным веществом конуса выбросов, конденсируется и осаждается вместе с ним на поверхность и/или превращается в пыль. При падении астероида в океан частично или полностью испаренное в процессе удара вещество ударника и грунта перемешивается с парами воды, что способствует его удержанию в атмосфере. При падении в поле силы тяжести частицы грунта тормозятся не только атмосферным воздухом, но и водяными парами.

На рис. 7 показано, какая масса вещества ударника и грунта сжимается до разных давлений. Испарение вещества ударника и мишени начинается при давлениях порядка 300 ГПа (Melosh, 2007). Заметное уменьшение массы частично или полностью испаренного вещества начинается при глубинах порядка 5–7 км, что неплохо коррелирует с данными по массе выбросов, остающихся в атмосфере через 30 мин после удара. При этом масса частично испаренного вещества ударника примерно равна массе частично испаренного вещества грунта. Поэтому можно предположить, что и в облаке выбросов, оставшихся в атмосфере через 30 мин массы вещества ударника и мишени тоже не сильно отличаются.



**Рис. 7.** Зависимости от давления  $p$  массы ударника (а) и грунта (б), сжатой в ударной волне до давления выше  $p$ . Массы измеряются в массах падающего астероида. Значения глубины океана в километрах указаны около каждой кривой.

Наличие слоя воды препятствует выбросу холодного грунта с краев кратера (конус выбросов), поэтому с увеличением глубины океана максимальная масса выбросов грунта заметно уменьшается. Частично или полностью испаренное при ударе вещество, которое и задерживается в атмосфере надолго, вылетает вверх внутри конуса выбросов, откуда вода уже удалена, и не испытывает сопротивление слоя воды. Поэтому максимальная масса выброшенного грунта сильнее зависит от глубины, чем масса частично или полностью испаренного при ударе вещества надолго остающаяся в атмосфере. Частично или полностью испаренное при ударе вещество ударника и мишени охлаждается за счет адиабатического расширения и перемешивания с парами воды и воздухом. С течением времени доля паров уменьшается, а доля конденсата увеличивается.

На первый взгляд, данные рис. 6 о содержании вещества ударника и грунта в атмосфере противоречат рис. 4, на котором объем, занимаемый веществом мишени, заметно уменьшается при увеличении глубины океана. Это кажущееся противоречие объясняется тем, что при больших  $H$  вещество грунта тормозится на меньших высотах, имеет большую плотность и, соответственно, меньший объем. Водяное облако, окружающее пары грунта при разлете, препятствует их расширению. В результате вещество грунта не так сильно расширяется, как при отсутствии воды, имеет

большую плотность и тормозится на меньших высотах в атмосфере.

Для глубины океана  $H = 3$  (близкой к средней глубине в настоящее время) были также рассчитаны варианты падения десятикилометровой кометы, состоящей из льда плотностью  $0.9 \text{ г/см}^3$ , и астероида, состоящего из дунита с плотностью  $3.3 \text{ г/см}^3$ . В последнем случае твердая часть мишени также состояла из дунита. При падении кометы масса выброшенной воды оказалась примерно такой же как при падении кварцевого астероида (на 10–20% больше), а масса выброшенного грунта в 3–4 раза меньше, причем через 20 мин после удара вещества грунта в атмосфере практически не остается. Замена кварца на дунит (в ударнике и мишени) приводит к заметному, в полтора-два раза, увеличению выброса грунта и слабо влияет на выброс воды.

### ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведенные расчеты показывают, что даже при падении десятикилометровых астероидов в океан в атмосферу выбрасывается большое количество вещества грунта. В зависимости от глубины современный океан делится на литоральную (до 200 м), батимальную (до 2500 м), абиссальную (до 6000 м) и хадальную (глубже 6000 м) зоны [Океанографическая энциклопедия, 1974]. Суммарная площадь литоральной и батимальной зон примерно равна площади суши, площадь хадаль-



ной зоны составляет около одного процента от полной площади океана.

Расчеты показывают, что при глубинах вплоть до 3 км (т.е. при падении в литоральную или батимальную зоны) максимальная масса выброшенного в атмосферу вещества грунта не более, чем в 2–3 раза отличается от массы выбросов при падении астероида на твердую поверхность. Более того расчеты показывают, что масса вещества грунта, остающаяся в атмосфере после осаждения в поле тяжести при глубинах до 5 км (т.е. при падении в литоральную, батимальную или абиссальную зоны) даже больше, чем при падении на твердую поверхность. И только при глубинах порядка 7 км и больше (при падении астероида в хадальную зону, составляющую около 1% от поверхности Земли) выбросы твердого вещества заметно уменьшаются по сравнению с выбросами при падении астероидов на сушу. Кроме того, при ударах в воду в атмосферу выбрасывается большое количество воды и содержащихся в ней солей (Birks и др., 2007). Таким образом можно сделать вывод, что при падении астероидов размером порядка десяти км в океан воздействие на атмосферу Земли будет, по-видимому, не менее сильным, чем при падении астероидов на сушу.

В описанных расчетах выбросы рассматривались как сплошная среда, термодинамические свойства которой описывались уравнением состояния. В реальности выбросы состоят из газобразных паров (и/или двухфазной смеси) и конденсированных частиц разного размера, которые в общем случае не двигаются с одинаковой скоростью. Кроме того, процесс турбулентного перемешивания воздуха и паров воды и грунта тоже рассматривался приближенно, на масштабах, больших размера расчетной ячейки. Также в работе рассматривались только вертикальные удары. Поэтому приведенные результаты могут рассматриваться как первое приближение, оценка и требуют дальнейшего уточнения.

Автор благодарен рецензенту Б.А. Иванову за полезные замечания. Работа выполнена в рамках государственного задания ИДГ РАН (рег. № 0146-2020-0003).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иванов Б.А. Простая модель кратерообразования // Метеоритика. 1979. № 38. С. 68–85.
- Кузнецов Н.М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965. 463 с.
- Океанографическая энциклопедия. Гидрометеиздат, 1974. 632 с.

Шувалов В.В., Трубецкая И.А. Численное моделирование образования подводной ударной структуры Элтанин // Астрон. вестн. 2007. Т. 41. № 1. С. 61–69. (Shuvalov V.V., Trubetskaya I.A. Numerical modeling of the formation of the Eltanin submarine impact structure // Sol. Syst. Res. 2007. V. 41. № 6. P. 56–64.)

Шувалов В.В., Хазинс В.М. Численное моделирование возмущений в ионосфере, генерируемых при падении Челябинского и Тунгусского космических тел // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 2. С. 142–151. (Shuvalov V.V., Khazins V.M. Numerical Simulation of Ionospheric Disturbances Generated by the Chelyabinsk and Tunguska Space Body Impacts // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 2. P. 129–138.)

Ahrens N.J., O'Keefe J.D. Impact on the Earth, ocean and atmosphere // Int. J. of Impact Engin. 1987. V. 5. P. 13–32.

Alvarez L.W., Alvarez W., Asaro F., Michel H.V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction // Science. 1980. V. 208. P. 1095–1108.

Birks J.W., Crutzen P. J., Roble R.G. Frequent ozone depletion resulting from impacts of asteroids and comets // Comet/asteroid impacts and human society / Eds Bobrowsky P.T., Rickman H. Berlin: Springer, 2007. P. 225–245.

Claeys P. Impact events and the evolution of the Earth // Advances in Astrobiology and Biogeophysics, Lectures in Astrobiology II / Eds Gargaud M., Martin H., Claeys P. Berlin: Springer Verlag, 2007. P. 239–280.

Feulner G. Limits to biodiversity cycles from a unified model of mass–extinction events // Int. J. Astrobiology. 2011. V. 10. P. 123–129.

Hildebran A.R., Penfield G.T., Kring D.A., Pilkington M., Camargo–Zanoguera A., Jacobsen S.B., Boynton W.V. Chicxulub crater. A possible Cretaceous–Tertiary Boundary impact crater on the Yucatan peninsula, Mexico // Geology. 1991. V. 19. P. 867–871.

Johnson B.C., Melosh H.J. Formation of spherules in impact produced vapor plumes // Icarus. 2012. V. 217. № 1. P. 416–430.

Kring D.A. The Chicxulub impact event and its environmental consequences at the Cretaceous–Tertiary boundary // Palaeogeography, Palaeo–climatology, Palaeoecology. 2007. V. P. 255: 4–21.

Koeberl K., Ivanov B. Asteroid impact effects on Snowball Earth // Meteorit. and Planet. Sci. 2019. V. 54. № 10. P. 2273–2285.

Melosh H.J. A hydrocode equation of state for SiO<sub>2</sub> // Meteorit. and Planet. Sci. 2007. V. 42. № 12. P. 2079–2098.

Potter R.W.K., Kring D.A., Collins G.S., Kiefer W.S., McGovern P.J. Numerical modeling of the formation and structure of the Orientale impact basin // J. Geophys. Res.: Planets. 2013. V. 118. № 5. P. 963–979.

Racki G. The Alvarez impact theory of mass extinction; limits to its applicability and the “great expectations syndrome” // Acta Palaeontologica Polonica. 2012. V. 57. № 4. P. 681–702.

- Rampino M.R.* Relationship between impact-crater size and severity of related extinction episodes // *Earth-Science Rev.* 2020. V. 201. P. 102990.
- Robertson D.K., Gisler G.R.* Near and far-field hazards of asteroid impacts in oceans // *Acta Astronautica.* 2019. V. 156. P. 262–277.
- Shuvalov V.V.* Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // *Shock Waves.* 1999. V. 9. № 6. P. 381–390.
- Shuvalov V., Dypvik H.* Ejecta formation and crater development of the Mjolnir impact // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2004. V. 39. № 3. P. 467–479.
- Svetsov V.V., Shuvalov V.V.* Silicate impact-vapor condensate on the Moon: Theoretical estimates versus geochemical data // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2016. V. 173. P. 50–63.
- Thompson S.L., Lauson H.S.* Improvements in the Chart D radiation-hydrodynamic CODE III: Revised analytic equations of state. Report SC-RR-71 0714. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 1972. 119 p.
- Wunnemann K., Ivanov B.A.* Numerical modeling of the impact crater depth-diameter dependence in an acoustically fluidized target // *Planet. Space Sci.* 2003. V. 51. P. 831–845.