

# ПОПИГАЙСКОЕ КАТАСТРОФИЧЕСКОЕ ИМПАКТНОЕ СОБЫТИЕ 35 МЛН. ЛЕТ НАЗАД: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАДИЙ КОНТАКТА И НАЧАЛЬНОЙ ЭСКАВАЦИИ

А.С. Вишневский, И.А. Балаганский

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск–92, Россия

С.А. Вишневский

Институт минералогии и петрографии, Новосибирск–90, Россия

В конце эоценовой эпохи, около 35 млн. лет назад, произошло массовое вымирание морских организмов и похолодание климата [1]. В синхронных или близких по возрасту осадках терминального эоцена содержатся маломощные горизонты (от 1 до 3), в которых обнаружены аномалии иридия [2, 3], концентрации микротектитов [4], глобулы клинопироксена [5], а также зерна импактированного кварца с планарными элементами и коэсит [6]. Подобно тому, как это было предложено для мел–палеогенового вымирания [7], для событий терминального эоцена высказана и плодотворно разрабатывается гипотеза, согласно которой произошедшие изменения биоты и климата связаны с импактным событием и носят либо внезапный катастрофический характер (одно или несколько тесно сближенных во времени падений гигантских метеоритов, [3]), либо являются следствием более растянутых во времени последствий, связанных с такими падениями [8].

Наиболее вероятной причиной таких событий с точки зрения импактной гипотезы является Попигайский метеоритный кратер диаметром 100 км и возрастом ~35 млн. лет, расположенный на севере Сибирской платформы [9]. Он заложен на двуслойной мишени (архейские гнейсы с плотностью до  $2,9 \text{ г/см}^3$  и осадочный чехол мощностью до 1,5 км, сложенный различными породами протерозоя, палеозоя и мезозоя, включая рыхлые пески и глины с плотностью до  $1,5 - 2 \text{ г/см}^3$ ). Энергия Попигайского импактного события оценивается в  $6,24 \cdot 10^{22} \text{ Дж}$ , а диаметр упавшего тела в каменном варианте — до 5 км, при средней скорости падения  $24,6 \text{ км/с}$  [10]. Представляло интерес произвести численное моделирование Попигайского импактного события с целью оценить его возможный вклад в формирование глобальной аномалии иридия и горизонтов с микротектитом в катастрофных слоях терминального эоцена.

На первом этапе исследований, результаты которого излагаются в настоящем сообщении, мы смоделировали стадии контакта, сжатия и начальной эскавации материала при образовании Попигайского кратера. Эти стадии наиболее важны для образования иридиевой аномалии и горизонтов с микротектитом в пограничных слоях.

Лабораторная модель явления была построена с учетом критериев подобия. Для их получения на основе  $\pi$ -теоремы [11] были составлены безразмерные комбинации из 15 физических размерных (в системе СИ) величин, которые по [12] определяют процесс кратерообразования:  $m$  — масса метеорита;  $V$  — скорость удара;  $\rho_o$ ,  $\rho_{1l}$ ,  $\rho_{2l}$  — плотности ударника, осадочных пород и фундамента мишени;  $D$  — диаметр кратера;  $E_{op}$ ,  $E_{o1l}$ ,  $E_{o2l}$  — удельные энергии испарения материалов ударника, осадочных пород чехла и пород фундамента мишени;  $a_p$ ,  $a_{1l}$ ,  $a_{2l}$  — объемные скорости звука для взаимодействующих тел;  $Y_{1l}$ ,  $Y_{2l}$  — динамическая прочность материалов мишени на растяжение;  $g$  — ускорение свободного падения. Диаметр кратера может быть выражен как функция перечисленных величин. Для нашего случая, согласно  $\pi$ -теореме [11] следует, что из 15 параметров, размерности которых включают 3 независимые единицы (масса, длина и время) можно составить 12 безразмерных комбинаций:

$$\pi_1 = D^3 \sqrt{\frac{\rho_{1l}}{m}}; \quad \pi_4 = \frac{v^2}{E_{op}}; \quad \pi_7 = \frac{\rho_{2l}}{\rho_p}; \quad \pi_{10} = \frac{a_{1l}}{a_p};$$

$$\pi_2 = g \sqrt[3]{\frac{m}{\rho_p}}; \quad \pi_5 = \frac{\rho_p g D^4}{m v^2}; \quad \pi_8 = \frac{E_{o1t}}{E_{op}}; \quad \pi_{11} = \frac{a_{2t}}{a_p};$$

$$\pi_3 = \frac{\rho_p v^2}{Y_{2t}}; \quad \pi_6 = \frac{\rho_{1t}}{\rho_p}; \quad \pi_9 = \frac{E_{o2t}}{E_{op}}; \quad \pi_{12} = \frac{Y_{1t}}{Y_{2t}};$$

где  $\pi_1$  — безразмерный диаметр кратера,  $\pi_2$  — “гравитационный масштаб” события, обратно пропорциональный числу Фруда  $F = \frac{V^2}{g_1}$  по [12];  $\pi_3$  — параметр, определяющий значение прочности материала мишени, то есть число  $R_s = \frac{\rho V^2}{Y}$ , являющееся отношением инерциальных сил к прочности вещества  $H$ , по [12];  $\pi_4$  — параметр, характеризующий зависимость удельных энергий удара и испарения метеорита;  $\pi_5$  — параметр, определяющий соотношение потенциальной энергии полости промежуточного кратера и кинетической энергии ударника;  $\pi_6, \pi_7$  — отношения плотностей материалов мишени и ударника;  $\pi_8, \pi_9$  — отношения энергий испарения материалов мишени и ударника;  $\pi_{10}, \pi_{11}$  — отношения объемных скоростей звука для материалов взаимодействующих тел;  $\pi_{12}$  — соотношение прочностей материалов мишени. При этом, безразмерный диаметр  $\pi_1$  есть функция остальных параметров  $\pi_2 - \pi_{12}$ . Для расчета числовых значений безразмерных комбинаций требуется еще значение величины массы метеорита. Из кинетической энергии удара ( $6,24 \cdot 10^{22}$  Дж) и средней скорости падения метеорита  $24,6$  км/с она оценивается в  $2,06 \cdot 10^{11}$  т. Числовые значения безразмерных комбинаций приведены в таблице 1, а коэффициенты пересчета физических величин из реального процесса в лабораторный приведены в таблице 2. За базовый коэффициент пересчета мы приняли уменьшение линейных размеров в  $10^{-6}$  раз. В этом случае  $1$  мм расчетного поля нашей модели соответствует  $1$  км реального масштаба, а размеры этого поля мы выбрали  $50$  мм (ось  $R$ )  $\times$   $80$  мм (ось  $Z$ ); при этом ось  $R$  соответствует радиусу  $50$  км Попигайского кратера.

Таблица 1

### Числовые значения безразмерных комбинаций

Параметр	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_6$
Значение	21,2	$7,4 \times 10^{-5}$	$1,78 \times 10^4$	8,07	22,4	0,74
Параметр	$\pi_7$	$\pi_8$	$\pi_9$	$\pi_{10}$	$\pi_{11}$	$\pi_{12}$
Значение	0,91	0,07	0,21	0,69	0,75	0,012–0,1

Таблица 2

### Коэффициенты пересчета для физических величин из реального процесса в лабораторный

Физическая величина	$m$	$V$	$\rho_p, \rho_{1t}, \rho_{2t}$	$D$	$E_p, E_{1t}, E_{2t}$	$a_p, a_{1t}, a_{2t}$	$Y_{1t}, Y_{2t}$	$g$	$t$
Коэффициент пересчета	$10^{-18}$	1	1	$10^{-6}$	1	1	1	$10^6$	$10^{-6}$

Для моделирования процесса использовалась программа “СТЕРЕО-РС”, разработанная под руководством Б.П. Крюкова. Она позволяет проводить моделирование взрывных и ударных процессов со сложным взаимодействием ударных волн и волн разрежения в условиях высокой концентрации энергии и меняющейся геометрии течения. При этом математическое моделирование заключается в численном моделировании уравнений механики сплошной среды, с учетом начальных и граничных условий и ряда особенностей материалов взаимодействующих тел. В расчете течений

программа использует “метод индивидуальных частиц” по [13]. Моделирование производилось на компьютере АТ 386/387 (такты частота 40 МГц, оперативная память 4 Мбайт, среда MS-DOS) в двумерной осесимметричной постановке. Поскольку вычисления производились в гидродинамической постановке без учета прочности материалов и силы тяжести, то численный эксперимент был ограничен только стадиями контакта, сжатия и начальной эскавации материала, при которой роль указанных выше параметров несущественна. Уравнения состояния исходных тел задавались в форме уравнения Тиллотсона:

$$P = \left[ a + \frac{b}{\frac{E}{E_0 \eta^2} + 1} \right] \rho E + A\mu + B\mu^2.$$

где:  $\eta = \frac{\rho}{\rho_0}$ ;  $\mu = \eta - 1$ ;  $a, b, A, B$  — параметры Тиллотсона;  $E_0$  — энергия испарения.

Значения этих параметров для тел, участвующих в процессе, приведены в таблице 3, где в качестве материала метеорита взят габброидный анортозит, осадочных пород чехла — галит и кристаллического фундамента мишени — гранит.

Таблица 3

Параметры уравнения Тиллотсона

Материал	$\rho, g/cm^3$	$a$	$b$	$A, GPa$	$B, GPa$	$E_0, m^2/s^2$	$\alpha$	$\beta$
Габбро-анортозит	2,94	0,5	1,5	71	75	487	5	5
Галит	2,16	0,5	0,6	25	30	5	5	5
Гранит	2,6	0,5	1,3	18	18	16	5	5

Конфигурации полей течения материалов ударника и мишени на разных стадиях процесса показаны на рис. 1, а–г. График изменения давления по времени приводится на рис. 2. Графики распределения плотности, а также вертикальной и радиальной компонент скорости разлета частиц в некоторых сечениях расчетного поля для момента времени 3,8 мкс показаны, соответственно, на рис. 3, 4, 5.

Полученные данные показывают, что для смоделированных стадий процесса определяющую роль играют два фактора: 1) интенсивное испарение вещества ударника и мишени; 2) кумулятивный эффект, с вертикальным выбросом испаренного вещества метеорита. При этом испаренное вещество мишени приобретает скорости эскавации с радиальной компонентой до 1,13 км/с и с вертикальной компонентой до 5,23 км/с; испаренный материал ударника (плотности пара от 0,001 до 0,4 г/см<sup>3</sup>) в сфере действия кумулятивной струи выбрасывается в вертикальном направлении со скоростями от 0,1 км/с до 14,6 км/с. При этом высокоскоростные (>9 км/с) потоки испаренного вещества метеорита имеют плотность < 0,007 г/см<sup>3</sup>.

Испаренное вещество ударника полностью переходит во взрывное облако, и существенная его часть покидает кратер. Так,  $\sim 2,4 \cdot 10^9$  т (около 1,2% массы метеорита) приобретает скорости выше 11,2 км/с и должно быть потеряно Землей.  $\sim 1,7 \times 10^{10}$  т (8,3% массы метеорита) выбрасывается со скоростями 2,0–11,2 км/с и способно к глобальному рассеянию.  $\sim 5,6 \cdot 10^{10}$  т (27,2% массы метеорита) выбрасывается со скоростями 0,72–2,0 км/с, покидая кратер и отлагаясь вокруг него на расстояние до 500 км.  $\sim 1,31 \times 10^{11}$  т (или оставшиеся 63,3% массы метеорита) отлагались из взрывного облака внутри кратера, преимущественно в верхних горизонтах аллогенного заполнения кратерной воронки.  $\sim 1,5 \cdot 10^{12}$  т испаренного вещества мишени (пары с плотностью 0,03–0,39 г/см<sup>3</sup>) и, в первую очередь, мезозойских пород осадочного чехла, выбрасывалось со скоростями 2,0–5,4 км/с, также способное к отложению на расстояния > 500 км и к глобальному рассеянию. Полученные результаты представляют определенный интерес для проблемы миграции метеоритного вещества и генезиса тектитов.

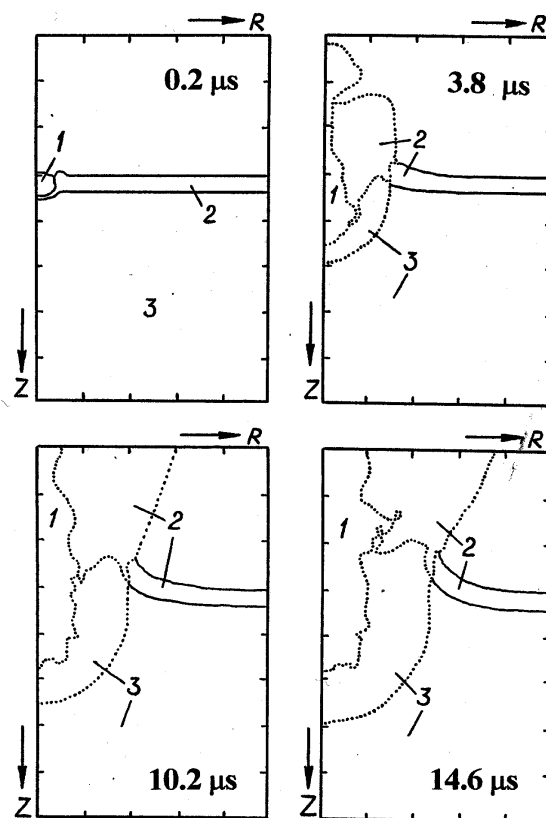


Рис. 1, а-г. Конфигурации полей течений материалов в различные моменты времени:

а)  $t = 0,2$  мкс, стадия контакта и сжатия; б)  $t = 3,8$  мкс, ~ 70 % ударника продолжает двигаться в направлении удара, остальная часть испарилась и движется на выброс по вертикали со скоростями до 14,6 км/с; в)  $t = 10,2$  мкс, продолжается рост промежуточного кратера, все вещество ударника испарилось и выбрасывается со скоростями более 0,1 км/с; г)  $t = 14,6$  мкс, рост полости промежуточного кратера прекращается, пары ударника покидают кратер. 1 — вещество метеорита; 2 — вещество осадочного чехла; 3 — вещество фундамента мишени; точечные линии — границы зон испаренного вещества. Разметка осей расчетного поля сделана через 10 мм.

Вопрос о миграции метеоритного вещества при Попигайском событии важен при обсуждении природы глобальной аномалии иридия в отложениях терминального эоцена, поскольку с этой аномалией коррелирует вымирание биоты и изменение климата. Возможность преодоления атмосферного барьера при высокоскоростном выбросе вещества Попигайского метеорита (равно как и при других крупномасштабных импактных событиях) допускается с учетом следующих обстоятельств: 1) как минимум, на высоту до 10–15 км (в слое, где сосредоточено до 40–60% всей массы воздуха) атмосфера в момент удара была возмущена по следу движения метеорита; 2) в пересчете на единицу площади лобовой поверхности потока удельная масса высокоскоростных выбросов (эквивалентная слою пород мощностью 3–5 км) на два и более порядков превосходит массу противодействующего столба атмосферы (эквивалентную 10-метровому слою воды); при таком различии между сопротивлением преграды и энергией потока выбросов атмосфера была просто сорвана в центральной части растущего кратера и ликвидирована как препятствие; 3) в центральной области кратера выбросы двигались по крутым траекториям, преодолевая атмосферный барьер по кратчайшему пути. Таким образом, Попигайская астроблема в состоянии обеспечить глобальное рассеяние метеоритного вещества и аномалию иридия в пограничном слое.

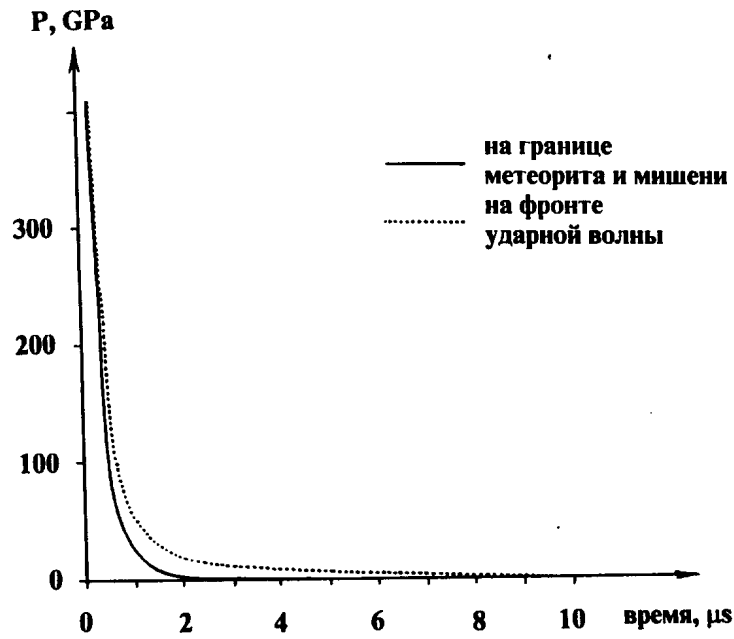


Рис. 2. Графики осевой компоненты скорости разлета вещества в сечениях  $R = 0$  мм и  $R = 11$  мм расчетного поля в момент времени  $t = 3,8$  мкс.

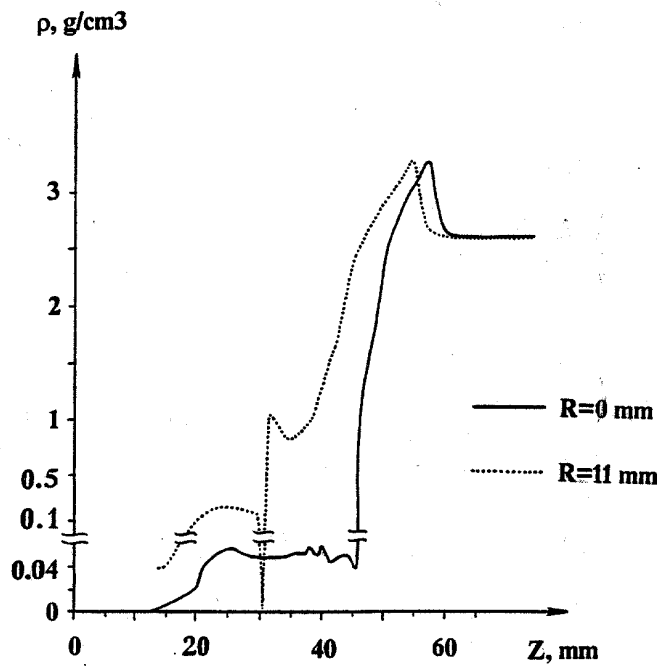


Рис. 3. Графики изменения давления в точке контакта ударника с мишенью (1) и на фронте ударной волны (2) в зависимости от времени на оси симметрии.

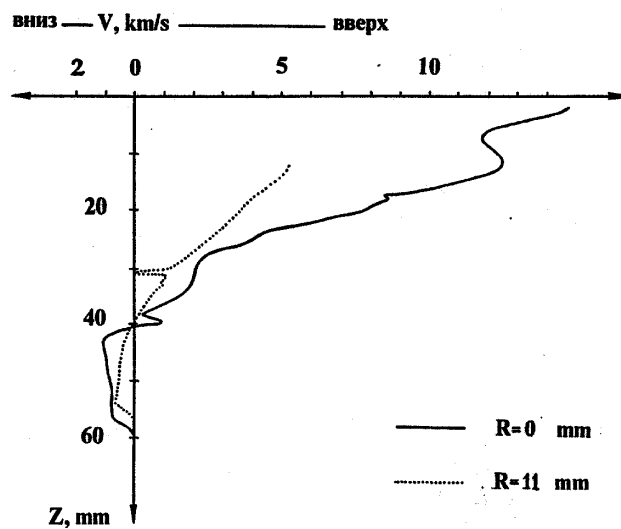


Рис. 4. Графики распределения плотности в сечениях  $R = 0$  мм и  $R = 11$  мм расчетного поля в момент времени  $t = 3,8$  мкс.

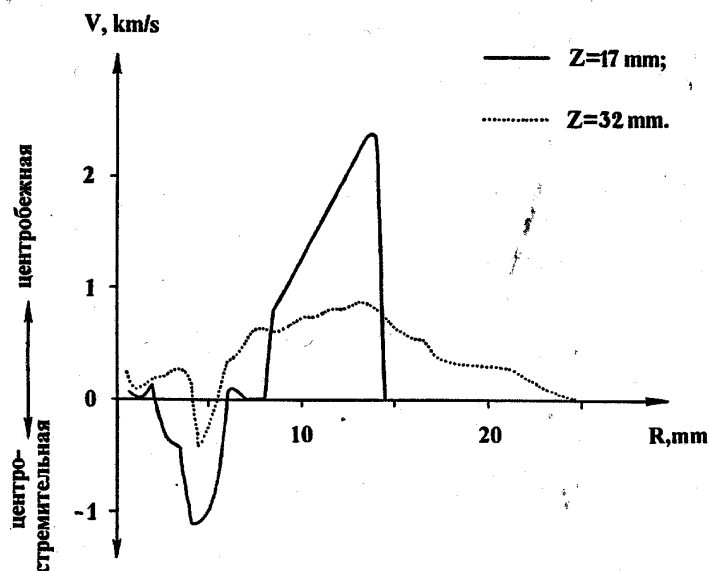


Рис. 5. Распределение радиальной компоненты скорости разлета частиц мишени в сечениях  $Z = 17$  мм и  $Z = 32$  мм расчетного поля в момент времени  $t = 3,8$  мкс.

Среди ряда вопросов, дискутируемых по проблеме генезиса тектитов в рамках общепризнанной гипотезы их земного импактного происхождения, можно отметить и вопрос об источнике вещества этих стекол. Особенностью тектитов является их изотопное и геохимическое соответствие горизонтам обычных рыхлых пород чехла, таким как глины, лесс и им подобные образования [14, 15].

Моделирование Попигаевского импактного события на контрастной двуслойной мишени показывает, что именно верхний ее горизонт (рыхлые меловые отложения) подвергся наиболее сильному ударному метаморфизму, включая испарение, и приобретает самые высокие, до 5 и более км/с, скорости выброса, достаточные для глобального рассеяния этого вещества. Конденсируясь, такой пар мог образовать капли силикатного тектитного стекла, которые затем отложились в пограничном слое. Таким образом, с позиций нашего вычислительного эксперимента находят объяснение особенности химического состава стекол микротектитов в осадках терминального эоцена. Что же касается преодоления атмосферного барьера, то все сказанное выше для рассеяния метеоритного вещества остается справедливым и для тектитов.

## Выводы

Численное моделирование Попигайского импактного события с помощью полученных критериев подобия показывает, что: 1) на стадии сжатия и начальной эскавации определяющую роль играли интенсивное испарение вещества метеорита и пород мишени; 2) в процессе испарения проявилось центростремительное движение паров ударника с кумулятивным эффектом, в результате чего наблюдался их вертикальный выброс со скоростями до 14,6 км/с; 3) часть вещества метеорита (до 1,2%) была утрачена Землей; до 8,3% этого вещества подверглось глобальному рассеянию; 27,2% отложилось за пределами кратера, на расстоянии до 500 км от его центра; остальное вещество отложилось преимущественно в верхних горизонтах аллогенных отложений кратерной воронки; 4) значительное количество вещества мишени и, в первую очередь, рыхлых мезозойских пород, было испарено и выброшено из кратера, подвергшись глобальному рассеянию; 5) продукты глобального рассеяния вещества Попигайского метеорита и испаренного вещества мезозойских пород мишени могли обеспечить аномалию иридия и горизонты с микротектитам, наблюдаемые в отложениях терминального эоцена.

## Литература

1. Montanari A. (1990). Geochronology of the Terminal Eocene impacts; an update. — In: Geological Society of America Special Paper 247, p. 607–616.
2. Asaro F., Alvarez L.W., Alvarez W., and Michel H.E. (1982). Geochemical anomalies near the Eocene/Oligocene and Permian/Triassic boundaries. — In: Geological Society of America Special Paper 190, p.p. 517–528.
3. Montanari A., Asaro F., Michel H.E. and Kennet J.P. (1993). Iridium anomalies of Late Eocene age at Massignano (Italy) and ODB Site 689B (Maud Rise, Antarctic). — *Palaios*, 8, p. 420–437.
4. Glass B.P., Baker R.N., Storzer D. and Wagner G.A. (1973). North American microtektites from the Caribbean Sea and their fission-track ages. *Earth & Planetary Science Letters*, 19, p. 184–192.
5. Glass B.P., Burns C.A., Crosbie J.R., and DuBois D.L. (1985). Late Eocene North– American microtektites and clinopyroxene-bearing spherules. — *Journal of Geophysical Research*, 90, D175–D196.
6. Bohor B.F., Betterton W.J., and Foord E.E. (1988). Coesite, glass and shocked quartz at DSDP Site 612: evidence for nearby impact in the Late Eocene. — *Lunar & Planetary Science Conference XIX*, p. 114–115.
7. Alvarez L.W., Alvarez W., Asaro F., and Michel H.E. (1980). Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction. — *Science*, 208, p. 1095–1108.
8. MacLeod N. (1990). Effects of Late Eocene impacts on planctic foraminifera. — *Geological Society of America Special Paper 247*, p. 595–606.
9. Масайтис В.Л., Мащак М.С., Селивановская Т.В. и др. (1980). Попигайская астроблема. — В кн.: *Геология астроблем*. Ленинград: Недра, с. 114–130.
10. Вишневикий С.А. (1994). Зювитовые мегабрекчии — новый тип отложений взрывного облака Попигайской астроблемы. 1. Общая характеристика. Новосибирск: препринт ИМП СО РАН, с. 66.
11. Седов Л.И. (1987). *Методы подобия и размерности в механике*. 10-е издание. Москва: Наука, 432 с..
12. Мелош Г. (1994). *Образование ударных кратеров: геологический процесс*. Москва: Мир, 336 с..
13. Агурейкин В.А. и Крюков Б.П. (1986). Метод индивидуальных частиц для расчета течений многокомпонентных сред с большими деформациями. — В кн.: *Численные методы механики сплошной среды*, 17, 1, с. 17–34.
14. Шуколюков Ю.А. и Явнель А.А. (1986). О происхождении тектитов. *Метеоритика*, 46, с. 156–164.
15. Tektites. (1973). V.E. Barnes & M.A. Barnes Eds. Stroudburg, Dowden, Hutchison & Ross Inc., 445 pp..