

15. Самаркин-Джарский К.Г. Происхождение и развитие сквозных троговых долин // Тез. докл. краевой студенческой. конф. Краснодар: Изд. КубГУ, 1979. С. 17–20.
16. Хрисанов В.А. Развитие современных геоморфологических процессов в Копетдаге и сопредельных горных странах. Белгород: Изд-во БелГУ, 1998. 128 с.
17. Шукин И.С. Общая морфология суши. М.–Л.: ГОНТИ НТКП СССР, 1938. Т. 2. 480 с.
18. Колосов Д.М. Геоморфологический очерк центральной части Корякского хребта // Тр. ГГУ Главсевморпути. М.–Л.: 1945. С. 75–98.
19. Уфимцев Г.Ф., Онухов Д.А., Тимофеев Д.А. Терминология общей геоморфологии. М.: Наука, 1977. 200 с.

Кубанский госуниверситет

Поступила в редакцию
18.01.2011

MORPHOLOGY AND GENESIS OF THE CROSSING SADDLES AND PASSES IN THE WEST CAUCASUS

Ju.V. YEFREMOV, A.A. SHELUGE

Summary

Formation and space distribution of crossing saddles as well as their morphological features depend on composition and strength of rocks. The most part of crossing saddles of the West Caucasus is located at the intersections of longitudinal and transverse tectonic faults. In this region there are three genetic types of the crossing saddles: primary tectonic, river destructive, and glacial ones. The genetic variety of saddles depends on characteristic features of geological structure and the intensity of geomorphological processes. The origin of mountain passes is conditioned by tectonic and erosion processes as well.

УДК 551.439(474.2)

© 2012 г. Т.Х. МООРА, А.В. РАУКАС

НОВЫЕ ДАННЫЕ О СТРОЕНИИ И ВОЗРАСТЕ КААЛИСКИХ МЕТЕОРИТНЫХ КРАТЕРОВ (о-в СААРЕМАА, ЭСТОНИЯ)

Введение

Каалиские кратеры на о-ве Сааремаа были первыми *научно* доказанными метеоритными кратерами в Европе. В их изучении принимали участие ученые из многих стран. До 1991 г. весьма плодотворными были совместные исследования, проводимые общими усилиями Комитета по метеоритам АН СССР и Комиссии по метеоритике АН Эстонской ССР. В последние десятилетия российские ученые в работах в Каали не участвовали и недостаточно знакомы с новыми достижениями в этой области. В связи с этим мы считаем своим долгом ознакомить российских читателей с результатами работ, которые осуществлялись после 1991 г.

С 1981 по 2010 гг. соавтор А. Раукас был председателем Комиссии по метеоритике Эстонской АН и организатором ряда международных совещаний по ме-

теоритике. В 1996–1999 гг. действовал проект МПГК 384 “Импактитные и внеземные сферулы”. В рамках этого проекта Каали был основным полигоном. В 2003–2004 гг. кратеры изучались совместными усилиями ученых Эстонии и Франции, а начиная с 2006 г. – по совместному проекту между академиями наук Эстонии и Польши.

Краткие сведения о расположении кратеров

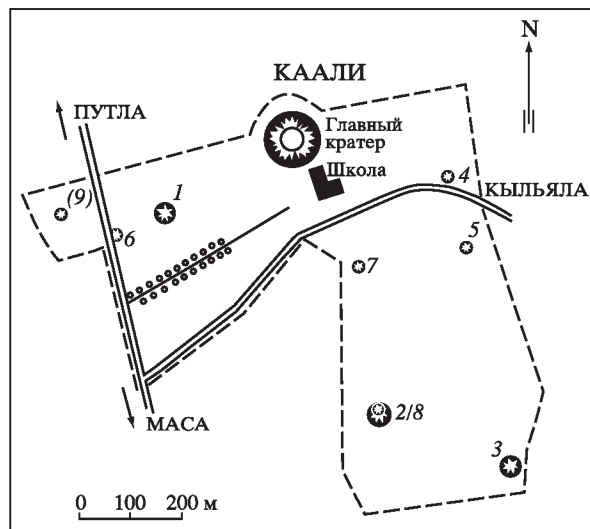


Рис. 1. Расположение Каалиских кратеров
Номерами обозначены малые кратеры



Рис. 2. Приподнятые взрывом пласты верхнесилурийских доломитов на внутреннем склоне главного кратера (фото Р. Тийрмаа)

Кратеры Каали (синонимы Салл, Эзель, Каалиярв) расположены на о-ве Сааремаа в 18 км к СВ от г. Курессааре, столицы острова (рис. 1). Главный кратер этой группы имеет диаметр 105–110 м и глубину 16 м. В кратере находится небольшое озеро, диаметр которого в зависимости от уровня воды колеблется в пределах от 30 до 50 м, а глубина от нескольких десятков сантиметров до семи метров. Осенью 1976 г. дно озера было сухое.

Кратер окружен 4–7-метровым валом, на внутреннем склоне которого обнажаются приподнятые, местами даже опрокинутые взрывом, мощные пласты верхнесилурийских доломитов (рис. 2).

Кроме главного кратера в Каалиской группе поблизости известны еще 8 мелких кратеров диаметром от 12 до 40 м. Это плоские чашевидные округлые углубления в горизонтально лежащих доломитах, покрытых слоем суглинистой основной морской толщины от 1.5 до 3 м. Главный кратер Каали является взрывным кратером, а мелкие кратеры типичными ударными. Мелкие кратеры недавно датированы люминесцентным методом [1–3].

Размеры метеоритных кратеров Каали и их возраст представлены в таблице.

Размеры метеоритных кратеров Каали и их возраст

№ кратера	Размеры, м	Диаметр, м	Глубина, м	Энергия Ек, эрг	Люминесцентный возраст, тыс. лет
1	39×34	37	4.0	2×10^{18}	5.8±0.9; 11.4±2.6
2(8)	53×36	45	2.0–3.5	3.5×10^{18}	9.8±2.3; 8.7±0.78
3	32×32	32	3.5	1×10^{18}	–
4	20×14	17	0.5–1.25	2×10^{17}	5.4±0.6
5	13×10	12	0.9	8×10^{16}	–
6	26×25	25	0.65	5.5×10^{17}	–
7	*	15	1.0		7.09±0.34; 7.16±0.41

* Оригинальные размеры кратера не известны, он десятилетиями служил хранилищем жижи и для этой цели был неоднократно расширен.

К истории изучения

Первые сведения о кратере Каали приводятся в работе И. Луце, в которой дается краткое описание котловины и указывается, что она возникла при “эксплозии подземного огня”, т. е. вследствие вулканического извержения [4]. Более подробное описание кратера приведено в работе Э. Гофмана, но в ней автор ничего не говорит о его генезисе [5].

Э. Эйхвальд высказал мнение, что кратер представляет собой древнеэстонское городище, в котором естественное озеро окружено искусственным земляным валом и помещается в карстовой воронке [6]. Этот взгляд разделял и Ф. Шмидт [7]. Как карстовую форму рассматривали кратер С. Куторга [8] и многие др. авторы.

Более популярной была все же вулканическая гипотеза. Ф. Вангенхэйм фон Квалена и К. Тейхерт, считали озерко в кратере типичным мааром [9, 10]. О. Линстов предполагал, что извержение газов было обусловлено естественной дистилляцией диктионемого сланца [11].

Ю. Карк, директор горного отдела Министерства торговли и промышленности Эстонии считал, что возникновение кратера связано либо с соляными, либо с гипсовыми структурами. Такое же мнение высказывал и Э. Краус [12]. Исходя из этой гипотезы, горному инженеру И. Рейнвальду в 1927 г. было предложено выяснить возможности нахождения в окрестностях Каали залежей каменной соли и гипса, а также осветить вопрос о происхождении озера Каали. В итоге эти работы и доказали метеоритное происхождение кратера.

Впервые идею о метеоритном происхождении кратера Каали выдвинул в 1919 г. И. Калкун-Кальювэ [13]. В качестве доказательства он указывал на морфологическое сходство этого кратера с Аризонским. И. Рейнвальд приступил к изучению главного кратера в ноябре 1927 г., заложив несколько канавок. Буровой скважиной, заложенной недалеко от озера, им были вскрыты горизонтально залегающие верхнесилурийские доломиты. Гипса или каменной соли обнаружено не было.

В дальнейшем И. Рейнвальд стал изучать также мелкие кратеры и пришел к заключению, что вся группа Каалиских кратеров образовалась при падении гигантского железного метеорита [14, 15]. Такое же предположение высказал А. Вегенер, который в 1927 г. вместе с И. Рейнвальдом, Р. Майером и Э. Краусом провел в Каалиских кратерах небольшие по объему полевые работы [12]. Но это не мешало немецким ученым считать Вегенера пионером в этой области [16, 17]. В противоположность И. Рейнвальду, А. Вегенер считал, что Каалиский метеорит был каменным.

Позже о метеоритном происхождении кратеров говорилось во многих публикациях, таких как А. Хинкса [18], К. Фишера [19, 20], В. Кранца [21] и др., но они

все были всего лишь предположениями, пока И. Рейнвальд в 1937 г. в малом кратере № 2 не нашел осколок метеоритного железа весом в 24 г, покрытый слоем ржавчины. В дальнейшем было обнаружено всего 28 осколков суммарным весом свыше 100 г. Детальное химическое и минерографическое изучение найденных железных осколков, проведенное И. М. Хеєм, и Л.И. Спенсером в Лондоне, подтвердили метеоритное происхождение осколков [22]. Метеорит принадлежит к группе 1А железных метеоритов и относится к крупнозернистым октаэдритам. И. Рейнвальд опубликовал свои данные в 1938 г. [23]. Окрыленный успехом Рейнвальд наметил широкую программу дальнейших исследований Каалиских кратеров, но в апреле 1941 г. он скончался.

Сотрудники Института геологии АН ЭССР (А. Аалоз, Э. Побул и др.) приступили к изучению кратеров летом 1955 г. Была произведена магнитометрическая съемка, и начались раскопки с целью изучения морфологии кратеров и поиска осколков метеорита. В 1959 г. по поручению Комитета по метеоритам АН СССР Каалиские кратеры обследовали Е.Л. Кринов, Л.Г. Кваша и И.Т. Зоткин. Они указали на необходимость усилить изучение кратеров.

До 1980 г. А. Аалоз были выяснены особенности геологического строения кратеров, обнаружены характерные “ударные конусы”, которые образуются в коренных породах при ударе метеоритов о землю, открыт новый малый кратер (№ 7) [24–28]. Были уточнены параметры падения метеорита [29–32], и начаты работы по изучению распыленного вещества как на самом поле кратера, так и за его пределами [33–35]. Т.И. Покровский определил диаметр метеорита 4.8 м, массу 450 т, угол падения 45° и скорость при падении 21 км/сек [30]. В.А. Бронштэн и К.П. Станюкович считали первоначальной массой метеорита 400–10 000 т и при падении 20–80 т, а скорость при падении 10–20 км/сек [29]. Судя по форме следа удара метеорита в кратере № 5, направление падения метеорита было с В или ЮВ, угол падения около 30° [25].

В 1965 г. и с 1972 по 1986 гг. в Каали проводились геофизические исследования сотрудниками Московского отделения Всесоюзного астрономо-геодезического общества (ВАГО), МГУ им. М.В. Ломоносова, Ин-та геологии АН ЭстССР и Комитета по метеоритам АН СССР. Были проведены электроразведочные [36, 37], сейсмические [38] и магнетометрические исследования [39], которые определили разрушенные зоны и доказали отсутствие больших масс метеоритного железа. Результаты работ до 1988 г. были обобщены Х. Вийдингом [40] и до 1994 г. Р. Тийрмаа [41].

Несмотря на большое количество опубликованных работ, многие проблемы до последнего времени остались слабо изученными или полученные результаты не соответствуют действительности. В частности сказанное относится к строению главного кратера и возрасту падения метеорита.

Строение главного кратера

Как ни странно, до последнего десятилетия, достоверные данные о морфологии главного кратера и о донных осадках озера Каали были весьма скудными. И. Рейнвальд заложил в районе кратера три скважины, одну вне кратерного вала и две с внутренней стороны, по которым заключил, что дно кратера почти горизонтальное и лишь слегка вогнутое [14]. Его работу продолжил А. Аалоз несколькими расчистками [26, 27]. Первые буровые скважины в донные отложения кратера были заложены и документированы только в 1979 г., когда Х. Кессел и Ю. Паап двумя скважинами достигли коренного дна кратера. В дальнейшем были пробурены еще несколько скважин: в 1991 г. Л. Саарсе [42], в 2001 г. А. Хейнсалу, Ю. Кэстлане и С. Вески [43], но полученные скважины не были увязаны с геодезической сетью и поэтому их трудно использовать.

В 1975 и 1976 гг. была проведена точная геодезическая съемка кратера. Составленная К. Мелла и уточненная Ю. Кэстлане и Т. Моора карта представлена на рис. 3. Изолинии на карте проведены через каждые 0.5 м. Заложены Ю. Кэстлане и Т. Моора 98 скважин и несколько шурфов и канав точно привязаны к геодезической сети.

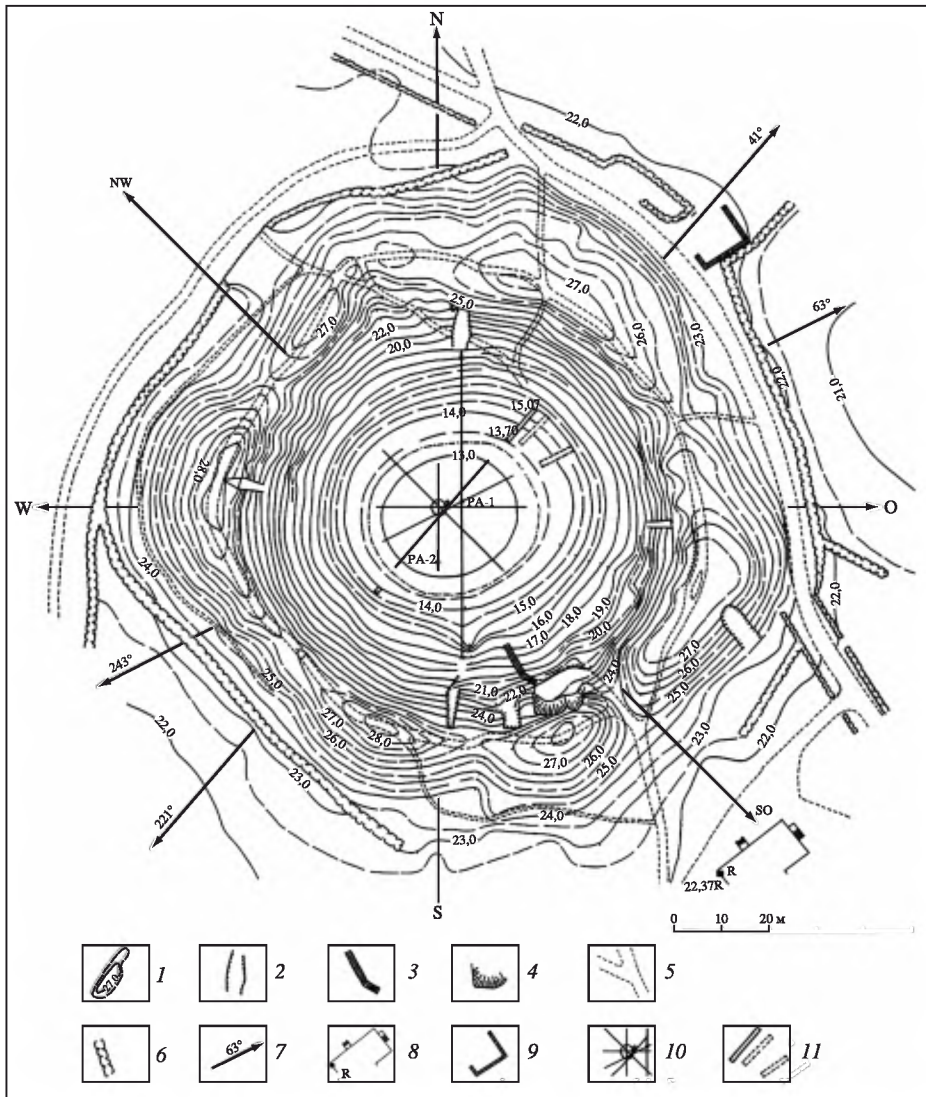


Рис. 3. Морфометрическая схема главного кратера, составленная К. Мелла и Т. Моора. R – высотный знак (22.37 м над у. м.)

1 – изолинии, 2 – старые шурфы, 3 – старая лестница, 4 – крутой склон, 5 – тропы, 6 – каменные ограды, 7 – линии геологических профилей, 8 – высотный знак геодезической сети, 9 – развалины, 10 – место пересечения профилей и каменной кучи вне центра кратера, 11 – новые шурфы

В связи с этим у нас сейчас имеется надежная основа для обоснованных геологических заключений [44–47].

Если рассматривать кратер сегментом шара, то выброшенный из кратера материал составляет 11253.76 м^3 . Значительная часть энергии (порядка $4 \cdot 10^{19}$ Дж.) взрыва (около 40%) была направлена вверх, причем высота газового выброса достигла 6.8–7.9 км [44]. Основная часть энергии была затрачена на образование кратера и кратерного вала. Глубина кратера от уровня гребня до дна кратера около 22 м. Главный кратер окружен валом из блоков доломита.

Неоднородность кратерного вала связана как с неоднородностью выброса материала в направлении падения метеорита, так и с многовековой деятельностью человека.

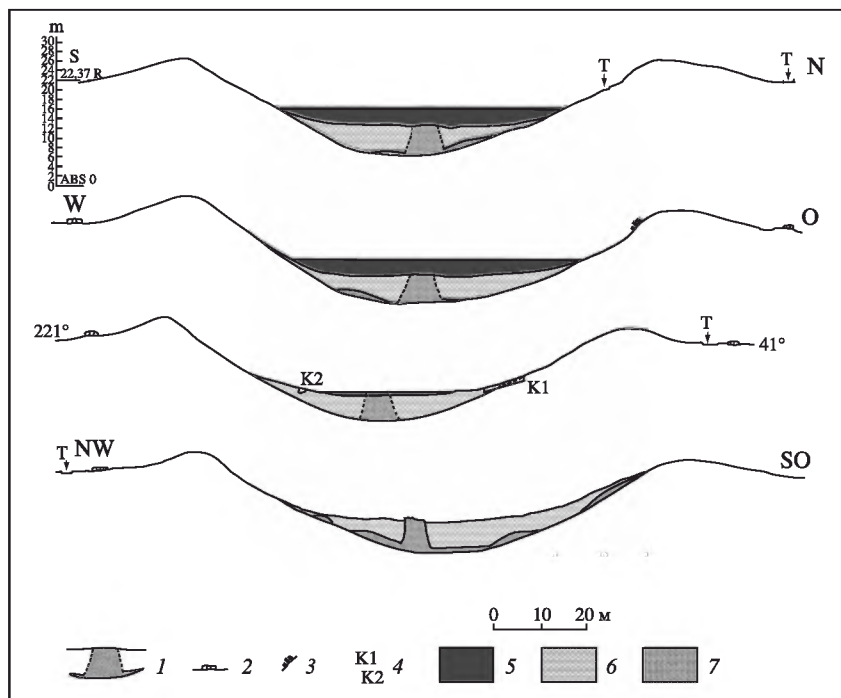


Рис. 4. Геологические профили главного кратера

1 – современная каменная куча в центре кратера, 2 – каменная оградка, 3 – глыбы доломита, 4 – шурфы, 5 – вода, 6 – голоценовые осадки озера, 7 – делювий

Верхняя часть вала образована выбросом из кратера насыпного материала, а нижняя – сдвинутыми блоками доломита, имеющими наклон 25–30° в сторону периметра структуры (кратера). Средний объем блоков доломита около 10 м³.

Под блоками доломита встречается в виде линз и неправильных скоплений объемом до 6 м³ светло-серая доломитовая мука с обломками доломита – характерный продукт разрушения взрывом карбонатных пород. На дне кратера залегает 8–10-метровая залежь аллохтонной брекчии из карбонатных пород ложа. Под ней залегает горизонтально-слоистый комплекс сильно деформированных и разрушенных доломитов (автохтонная брекчия), постепенно переходящий в неизменные коренные породы.

Заполняющие кратер озерные отложения разнородны (рис. 4). Интересной особенностью является обилие стволов деревьев, которые свалились в озеро со склонов кратера.

Время падения метеорита

О возрасте кратеров Каали высказаны различные предположения. Учитывая отсутствие морских отложений в кратере И. Рейнвальд оценивал возраст кратеров порядка 4000–5000 л.н. [15], А. Аалоз – около 3000–4000 л.н. [25]. Произведенные в 1961 г. радиометрические анализы древесного угля в малых кратерах дали цифры 2660 ± 200 лет [26, 27]. Позднее прибавились еще определения 2530 ± 130, 2660 ± 200 и 2920 ± 240 лет, на основе которых А. Аалоз считал наиболее вероятным возраст в 2660 ± 200 лет [48], а несколько позднее – 2880 ± 100 лет [49]. По этим аллохтонным кусочкам угля в малых кратерах, разумеется, нельзя правильно судить о возрасте кратеров.

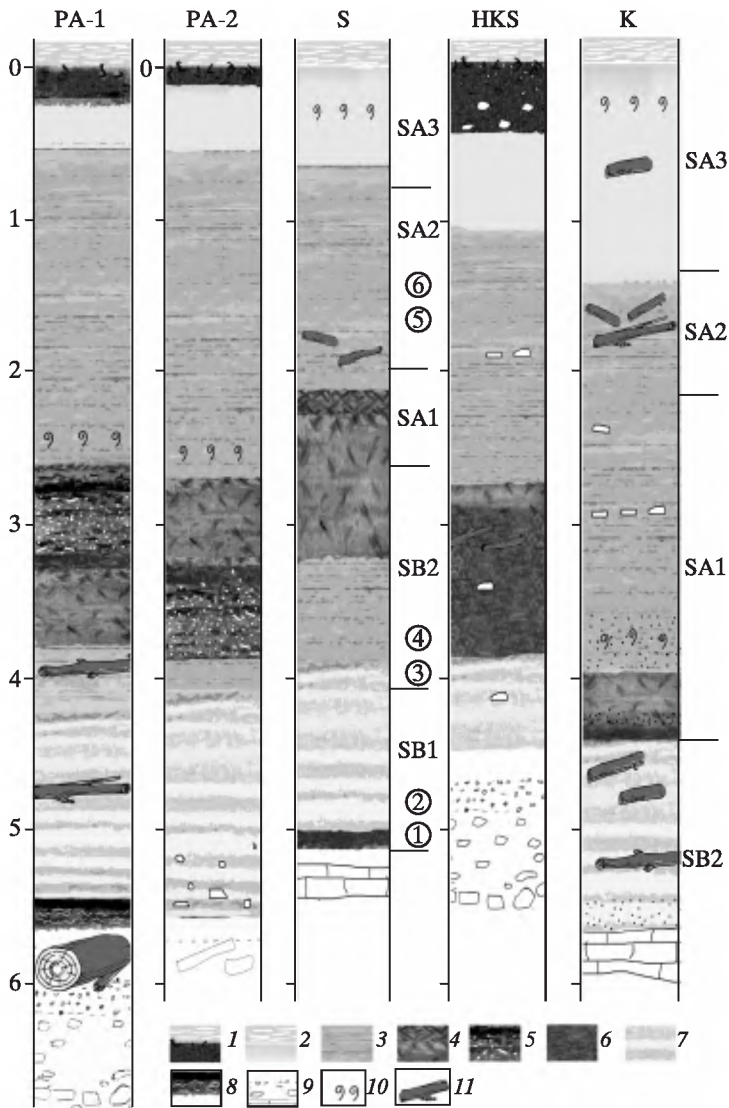


Рис. 5. Заполняющие главный кратер отложения

Разрез PA-1 и PA-2 (Моора и Кэстлане, 2000); S (Saarse, 1991); HKS (Veski, 2004); K (Saarse, 1991).

Вода и верхний слой: 1 – сапропеля, 2 – известкового сапропеля; остатки: 3 – растений в известковом сапропеле, 4 – древесины, 5 – гумусного слоя; 6 – гипсовые мхи; 7 – алеуритовый сапропель; 8 – гумус на озерном меле; 9 – локальная морена с пятнами гумуса на дне кратера; 10 – слон с малакофауной; 11 – стволы или массивные сучки деревьев

При бурении в июле 1975 г. в центре озера главного кратера обнаружены сапропель и торф мощностью 5.5 м. Возраст сапропеля – нижний максимум пыльцы ели и верхняя половина суббореального климатического периода. В результате этого Х. Кессел установила, что взрыв метеорита произошел не позднее 3500 л.н. [50]. Л. Саарсе с соавторами определили возраст донных осадков в $3390 \pm \pm 35$ BP (Tln -1353) [50].

Исследования следов иридия в болоте Пийла в 10 км к СЗ от Каали дали группе исследователей повод для омоложения возраста кратеров до 2800–2400 л.н. [43,



Рис. 6. Шурф, где был отобран ствол дерева возрастом 2673 ± 47 ^{14}C лет (фото Т. Моора, 14.10.2010)

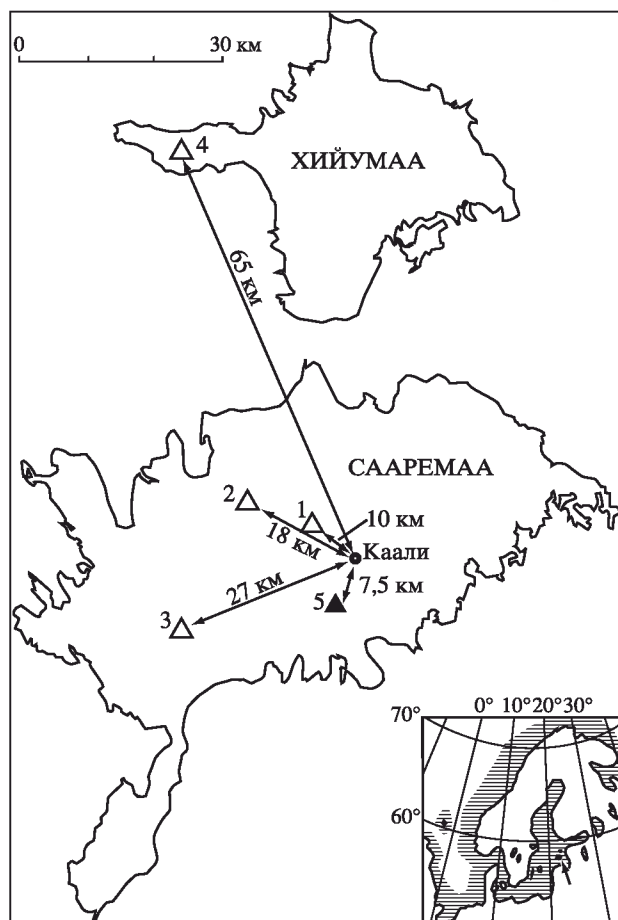


Рис. 7. Находки силикатных микроимпактитов и магнитных шариков на о-вах Хийумаа и Сааремаа
Силикатные: Пийла (1), Пелисоо (2), Питкасоо (3), Кыйвасоо (4);
силикатные и магнитные: Рэо (5)

51–53]. Но это заключение является явно ложным. Датированный нами торф с озера Каали с глубины уже 1.18–1.25 м дает ^{14}C возраст 2958 ± 51 ВР (Tln – 2576), что после дендрохронологической поправки соответствует 3260–3050 л.н.

Анализируя образец из ствола дерева (рис. 5, 6), найденного поблизости от места прежней датировки, мы получили возраст 2673 ± 47 ^{14}C лет (Tln – 2573). Но эти данные были получены не со дна озера. Таким образом, по прямым датировкам с кратера время падения метеорита было не менее 4000–5000 л.н.

Наиболее правдоподобные данные о возрасте кратеров нами получены по находкам оплавленных импактных силикатных шариков из слоев болотного торфа на о-вах Хийумаа и Сааремаа (рис. 7) [54–56]. В погребенном торфе под береговыми отложениями в 7.5 км к югу от Каали в карьере между деревнями Илпла и Рэо в изобилии найдены силикатные и магнитные микроимпактиты (рис. 8). Внеземное происхождение их определено проф. Марини (Франция). Нижняя часть

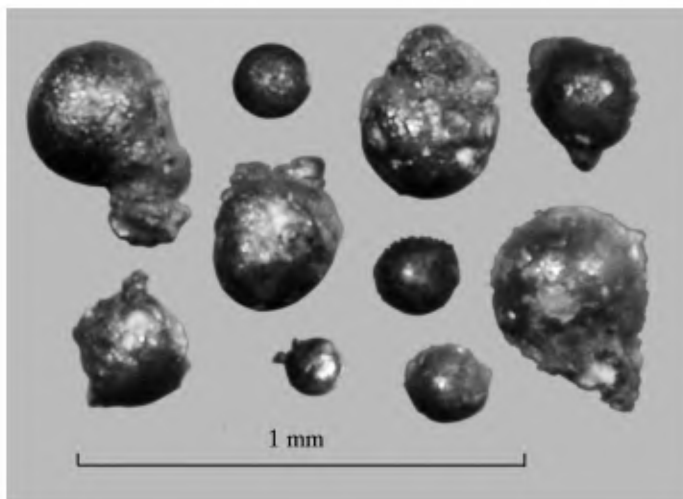


Рис. 8. Магнитные шарики из погребенного торфа Рэо

погребенной органики, содержащей микроимпактиты, датирована 7773 ± 120 л.н. ($T_{1n} - 2554$). Опираясь на данную C^{14} датировку мы считаем, что радиоуглеродный возраст около 7600 л.н. является самым правдоподобным временем падения Каалиского метеорита [3, 54–56].

Заключение

Каалиские кратеры являются одними из наиболее подробно и комплексно изученных кратеров в мире. Выявлены морфология и строение кратеров, время падения метеорита, его состав и распределение тонкораспыленного метеоритного вещества в отложениях внутри кратера.

Еще в 1927 г. И. Рейнвальд высказал идею о создании в Каали музея метеоритных кратеров. Такой музей был открыт в 2005 г. Он стал научным и привлекательным туристическим центром. В комплекс входят трактир, летнее кафе, гостиница, конференц-центр и рабочие кабинеты сотрудников. Проводятся международные научные конференции. Ежегодно Каалиские кратеры посещают около 50000 туристов, среди которых много известных и знаменитых людей. Здесь побывали высокие гости из многих стран: королева Дании Маргарет, президент Финляндии Т. Халонен и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stankowski W.T.J.* Luminescence dating as a diagnostic criterion for the recognition of Quaternary impact craters // *Planetary and Space Science*. 2007. V. 55. P. 871–875.
2. *Stankowski W.T.J., Raukas A., Bluszcz A., Fedorowicz S.* Luminescence dating of the Morasko (Poland), Kaali, Ilumetsa and Tsõdrikmäe (Estonia) meteorite craters // *Geochronometria*. 2007. V. 28. P. 25–29.
3. *Raukas A., Stankowski W.* On the age of the Kaali craters, Island of Saaremaa, Estonia // *Baltica*. V. 24. № 1. P. 37–44.
4. *Luce J.W. von.* Wahrheit und Muthmassung Beytrag zur ältesten Geschichte der Insel Ösel. Pernaу. 1827. P. 20–22.
5. *Hofman E.* Geognostische Beobachtung auf einer Reise von Dorpat bis Abo. Dorpat. 1837. 6.
6. *Eichwald E.* Die Grauwackenschichten von Liv- und Estland // *Bull. Soc. Nat. Moscou*. 1854. T. XXVII. № 1. P. 3–111.

7. Schmidt Fr. Untersuchungen über die Silurische Formation von Ehstland, Nord-Livland und Oesel // Archiv für die Naturkunde Liv-, Ehst- und Kurlands. I Serie. 1858. Bd. 2. Lief. 1. 248 s.
8. Kutorga S. Berichte über die Fortschritte im Berichte die Mineralogie, Geognosie, Paleontologie und mineralogischen Chemie in Russland // Verhandlungen Russ. Miner. Ges. 1853. P. 424–454.
9. Wangerheim von Qualen F. Der Krater bei Sall auf der Insel Oesel // Korrespondenzblatt des Naturforscher Vereins zu Riga. 1849. V. 3. P. 48–68.
10. Teichert C. Einige Bemerkungen zum “Krater von Sall” auf der Insel Oesel // Z. Geomorph. 1927. Bd. III. H. 2. P. 424–428.
11. Linstow O. Der Krater von Sall auf Oesel // Zentralblatt für Mineralogie und Geologie. 1919. V. 21/22. P. 326–339.
12. Kraus E., Meyer R., Wegener A. Untersuchungen über den Krater von Sall auf Ösel // Gerlands Beiträge zur Geophysik. 1928. V. 20. P. 312–378.
13. Kaljuvee J. Die Grossprobleme der Geologie. Tallinn (Reval): F. Wasserman, 1933.
14. Reinvald I. Bericht über geologische Untersuchungen am Kaali järv (Krater von Sall) auf Ösel // Loodusuurijate Seltsi Aruanded. 1928. V. 35. P. 30–70.
15. Reinvald I. Kaali järv – the Meteorite Craters on the Island of Ösel (Estonia) // Loodusuurijate Seltsi Aruanded. 1933. V. 39. P. 183–202.
16. Czegka W. The Contribution of Alfred Wegener to Meteoritics and Early Impact Research // Meteoritics and Planetary Science. 1996. V. 31, P. 33–34.
17. Czegka W., Tiirmaa R. Das Holozäne Meteoritenkratenfeld von Kaali auf Saaremaa (Ösel), Estland // Aufschluss. 1998. V. 49. P. 233–252.
18. Hinks A.R. Kurznotiz oder Überschrift // Geographical Journ. 1933. V. 82. P. 375.
19. Fisher C. The meteor crater in Estonia // Natural History. 1936. V. 38. № 4. P. 292–299.
20. Fisher C. Exploring Estonian meteor craters // Sky Magazine of Cosmic News. 1938. V. 2. № 5. P. 8–9.
21. Kranz W. “Krater von Sall” auf Ösel Wahrscheinlich “Meteoritenkrater” // Gerlands Beiträge zur Geophysik. 1937. V. 51. P. 50–55.
22. Spencer L.J. The Kaali järv Meteorite from the Estonian Craters // Mineralogical magazine. 1938. V. 25. P. 75–80.
23. Reinwald I. The finding of meteoritic iron in Estonian craters. A long search richly awarded // The Sky Magazine of Cosmic News. 1938. V. 2. № 6. P. 6–7.
24. Aaloe A. Kaali järve meteoriidikraatri nr. 5 uurimised 1955. aastal // ENSV TA Geoloogia Instituudi Uurimised. 1958. V. 2. P. 105–117.
25. Аалоз А.О. Новые данные о метеоритных кратерах на острове Сааремаа // Метеоритика. 1958. Вып. 16. С. 108–114.
26. Аалоз А.О. Об истории изучения Каалиских метеоритных кратеров // Тр. Ин-та геологии АН ЭстССР. 1963. Т. XI. С. 25–34.
27. Aaloe A., Liiva A., Pves E. Kaali meteoriidikraatri vanusest // Eesti Loodus. 1963. № 5. P. 262–265.
28. Аалоз А.О. Каалиские метеоритные кратеры // Человек и окружающая среда. 1978. Т. I. С. 129–133.
29. Бронитен В.А., Станюкович К.П. О кратерообразующих метеоритах // Тр. Ин-та геологии АН ЭстССР. 1963. Т. XI. С. 73–83.
30. Покровский Т.И. О расчете параметров метеорита по образованной им воронке // Тр. Ин-та геологии АН ЭстССР. 1963. Т. XI. С. 61–71.
31. Коваль В.И. О массе и составе метеорита Каали // Астрон. вестн. 1974. Т. VIII. № 3. С. 169–176.
32. Коваль В.И. О скорости метеорита Каали // Астрон. вестн. 1976. Т. X. № 1. С. 57–60.
33. Аалоз А., Тийрмаа Р. Распыленное метеоритное и импактное вещество на кратерном поле Каали // Изв. АН ЭстССР. Т. 30. Геология. 1981. № 1. С. 20–27.
34. Аалоз А.О., Тийрмаа Р.Т. Метеоритное вещество в мелких кратерах Каали и в их окрестности // Метеоритика. 1982. Вып. 41. С. 120–125.
35. Коваль В.И. О мелкодисперсном веществе с кратерного поля метеорита Каали // Астрон. вестн. 1980. Т. XIV. № 2. С. 102–111.
36. Аалоз А., Дабижка А., Карнаух Б., Стародубцев В. Геофизические исследования на главном кратере Каали // Изв. АН ЭстССР. 1976. Т. 25. Химия. Геология. № 1. С. 58–65.
37. Дабижка А.И., Золотая Л.А., Кузнецов В.А. и др. Электроразведочные исследования на метеоритных кратерах Каали // Регион. геология некоторых районов СССР. 1981. Вып. 5. С. 89–92.

38. Ляховицкий Ф.М., Гукленгоф М.Н., Захаров М.В., Алюнин А.В. Сейсмические исследования 1977 г. на метеоритных кратерах Каали // Регион. геология некоторых районов СССР. 1981. Вып. 5. С. 84–88.
39. Побул Э.А. Применение геофизических методов при исследовании метеоритных кратеров Эстонской ССР // Тр. Ин-та геологии АН ЭстССР. 1963. Т. XI. С. 45–50.
40. Viiding H. Kaali meteoriidikraatrite geoloogilisest uurimisest // Teaduse ajaloo lehekülgi Eestist. 1993. Т. IX. Geoloogia rajajooni Eestis. P. 46–53.
41. Tiirmaa R. Kaali meteoriidid. Tallinn: Eesti Teaduste Akadeemia Geoloogia Instituut. 1994. 104 p.
42. Saarse L., Rajamäe R., Heinsalu A., Vassiljev J. The biostratigraphy of sediments deposited in the Lake Kaali meteorite impact structure, Saaremaa Island, Estonia // Bul. of the Geol. Soc. of Finland. 1991. V. 63, P. 12–139.
43. Veski S., Heinsalu A., Lang V. et al. The age of the Kaali meteorite craters and the effect of the impact on the environment and man: evidence from inside the Kaali craters, island of Saaremaa, Estonia // Vegetation History and Archaeobotany. 2004. V. 13. P. 197–206.
44. Raukas A., Laigna K.-O. Height of the turbulent gas flow and transport distance of glassy spherules on the example of the Kaali impact, Estonia // Proceedings of the Estonian Academy of Science. Geology. 2005. V. 54. № 3. P. 145–152.
45. Raukas A., Moora T., Tiirmaa R. Kaali peakraatri morfologia // Eesti Geograafia Seltsi aastaraamat. 2005. V. 35. P. 76–88.
46. Moora T., Raukas A., Kestlane Ü. Kaali peakraatri setetest // Eesti Geograafia Seltsi aastaraamat. 2007. V. 36. P. 128–143.
47. Moora T., Raukas A., Kestlane Ü. Kaali peakraatri setetest // Muinasaja teadus. 2008. V. 17. Loodus, inimene ja tehnoloogia. № 2. P. 209–229.
48. Aaloe A., Eelsalu H., Liiva A., Lõugas V. Võimalusi Kaali kraatrite vanuse täpsustamiseks // Eesti Loodus. 1975. № 12. P. 706–709.
49. Aaloe A. Erinevused Kaali kraatrite vanuse määrangutes // Eesti Loodus. 1981. № 4. P. 236–237.
50. Kessel H. Kui vanad on Kaali järviku põhjasetted? // Eesti Loodus. 1981. № 4. P. 150–155.
51. Rasmussen L.K., Aaby B., Gwozdz R. The age of the Kaali meteorite craters // Meteoritics & Planetary Science. 2000. V. 35. P. 1067–1071.
52. Veski S., Heinsalu A., Kirsimäe K. et al. Kaali meteorite impact induced ecological catastrophe 800–400 BC, as revealed by pollen, XRD; LOI and ¹⁴C analyses of peat containing impact ejecta // In 6th ESF-IMPACT Workshop Impact Markers in the Stratigraphic Record. Abstract Book. Granada (Spain). May, 19–25. 2001. P. 132–135.
53. Veski S., Heinsalu A., Kirsimäe K. Kaali meteoriidid vanus ja mõju looduskeskkonnale Saaremaa Piila raba turvaläbilõike uuringu põhjal // Eesti Arheoloogia Ajakiri. 2002. V. 6. № 2. P. 3–20.
54. Raukas A. Investigation of impact spherules – a new promising method for the correlation of Quaternary deposits // Quaternary Int. 2000. V. 68–71. P. 241–242.
55. Raukas A., Pirrus R., Rajamäe R., Tiirmaa R. On the age of meteorite craters at Kaali (Saaremaa Island, Estonia) // Proceedings of the Estonian Academy of Sci. Geology. 1995. V. 44. P. 177–183.
56. Raukas A., Pirrus R., Rajamäe R., Tiirmaa R. Tracing the age of the catastrophic impact event in sedimentary sequences around the Kaali meteorite craters on the Island of Saaremaa, Estonia // Journ. of the European Network of Sci. and Technical Cooperation for the Cultural Heritage (PACT). 1999. V. 57. P. 435–453.

Ин-т истории Таллиннского ун-та,
Ин-т экологии Таллиннского ун-та

Поступила в редакцию
10.08.2011

NEW DATA ON THE STRUCTURE AND AGE OF THE KAALI METEORITE CRATERS (ISLAND OF SAAREMAA, ESTONIA)

T.Kh. MOORA, A.V. RAUKAS

Summary

Kaali meteorite craters are located on the Island of Saaremaa, 18 km northeast of its chief town Kuressaare, being the first established meteorite craters in Europe. Nine meteorite craters formed about 7500 years BP as a result of single iron meteorite falling apart, which was a typical coarse octahedrite with Fe/Ni ratio being equal to 91.5/8.3. Craters are spread within a wildlife reserve of the total area about 50 ha. Craters were formed in a two-layered target rock: till and dolomite. The diameter of the main crater is 105–110 m.