

ПЕРСПЕКТИВЫ МИКРОПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ
ВУЛКАНОГЕННО-ОСАДОЧНЫХ КРЕМНИСТЫХ ПОРОД
ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЯ

С эрой Палеопротерозоя связан важнейший этап в эволюции биосферы – появление и развитие эукариотных микроорганизмов. Основной информации о древнейшем периоде развития жизни на Земле служат фоссилизированные микроорганизмы, сохранившиеся в горных породах как минеральные псевдоморфозы. Однако точная идентификация микрофоссилий эукариотов затруднена из-за того, что их ядра, митохондрии, хлоропласты, жгутики и др. плохо сохраняются в ископаемом состоянии. Вместе с тем в отложениях неопротерозоя, палеозоя и мезозоя достоверно известны фоссилизированные остатки весьма сложных по морфологии эукариотных микроорганизмов, подобных современным амебам, диатомовым водорослям, фораминиферам и флагеллатам, очевидно возникших в более ранние геологические эпохи (Knoll, 1994; Kooistra, 1996; Pawlowski, et al. 2003; Bosak, 2011).

Проблема происхождения эукариот широко обсуждалась в отечественной и зарубежной литературе (Марков, 2005; Федонкин, 2003; 2006; Richards, 2005). Имеются неоднократные упоминания о находках в породах верхнего архея и палеопротерозоя фоссилизированных остатков микроорганизмов, относимых к эукариотам (Тимофеев, 1982, Schopf, 1993; Knoll, 1994; Сергеев, 2002; Астафьева, Розанов, 2012, 2013).

Самый большой пробел в летописи об эволюции биосферы – это отсутствие находок ископаемых вирусов. В современных экосистемах вирусы спутники всей клеточной жизни и самая многочисленная биологическая форма. Они превышают число прокариотов на порядок и более. Миллилитр морской воды содержит от 10^5 до 10^8 вирусов (Wommack and Colwell, 2000; Suttle, 2005; Filippini et al., 2008). Каждый день они убивают в океане около 20% биомассы, 90% которой составляют микроорганизмы (Mahy and Van Regenmortel, 2009). Считается, что в ранней эволюции биосферы вирусы являлись важным естественным средством переноса генов между различными видами и способствовали их генетическому разнообразию (Weinbauer, 2004; Sullivan et al., 2006; Kenzaka, et al., 2007).

В 1992 году в амёбе *Acanthamoeba polyphaga* был обнаружен гигантский вирус рода *Acanthamoeba polyphaga mimivirus* (мимивирус), в тысячу раз превосходящий по размерам известные вирусы (La Scola, et al., 2003; Klose, et al., 2010). Нуклеокапсид мимивируса имеет форму близкую к икосаэдру – правильному выпуклому многограннику, в котором имеются шесть вращательных осей симметрии пятого порядка, невозможных в трёхмерной периодической решётке кристаллов. В сечениях нуклеокапсиды имеют формы близкие к зональным шестигранникам. Геном мимивируса, состоящий из молекул ДНК и РНК, содержит 1 181 404 пары оснований, в то время как известные вирусы имеют либо ДНК, либо РНК, и от трёх до ста генов

(Legendre, 2012). В 2010 году в образце морской воды, взятом у побережья Чили, был открыт родственник мимивируса, названный мегавирусом, который по размерам даже превышает некоторые эукариотические клетки (Claverie, Abergel, 2016). Геном мегавируса – самый большой среди вирусов и состоит из 1,26 миллиона пар нуклеотидов, что всего примерно в 2,3 тысячи раз короче человеческого (Arslan, et al., 2011). Считается, что «общий предок этих вирусов произошел от клеточного организма, а сами они эволюционировали посредством постепенной деградации генома» (Arslan, et al., 2011).

Филогенетический анализ генома мими- и мегавирусов может указывать на их длительную эволюцию и древнее происхождение (Holmes, 2003; Venson et al., 2004; Rice et al., 2004). Однако сведения о находках микрофоссилий вирусов даже в четвертичных породах в литературе отсутствуют. Вместе с тем имеются данные об экспериментальной фоссилизации вирусов кремнеземом, проникающим в различные вирусные структуры – белки и оболочки (Range, et al. 2011; James, et al. 2010). При этом окремненные вирусы могут покрываться оксидами железа (Kyle, et al. 2008). Эти исследования предполагают, что вирусные структуры могут сохраняться в горных породах, хотя их идентификация может быть сложной задачей из-за малых размеров вирусных частиц, которые разрушаются на стадии превращения осадка в кристаллический минеральный агрегат.

Важным условием сохранения морфологии бактерий и эукариот в ископаемом состоянии является их очень быстрая минерализация, которая должна была происходить до начала деградации тел микроорганизмов, с сохранением деталей внутреннего строения. Микроорганизмы без минерального скелета лучше всего консервируются в хемогенно-осадочных кремнистых породах. Изучение окремнения цианобактерий около современных термальных источников (Крылов, Тихомирова, 1988; Renaux, Jones, 1998; Сергеев, 2003; Benning, et al. 2002; Розанов, Ушатинская, 2011) и экспериментальные исследования (Westall, et al. 1995; Герасименко и др., 2004; Жегалло и др., 2007; James et al. 2010;) показали, что эти процессы происходили в интервале нескольких часов, практически при жизни микроорганизмов. При быстром окремнении микрофоссилии полностью сохраняют свой объем и не подвержены дальнейшим диагенетическим изменениям (Карпов, 2017).

Хемогенно-осадочные кремнистые породы образуются не только около локальных термальных источников. Так, в вулканогенно-осадочных толщах Хогландской свиты (остров Гогланд в Финском заливе) с возрастом 1640 ± 11 млн лет (Belyaev, et al. 1996, 1998; Беляев, 2013), сложенной базальтами и риолитами с подушечными структурами, характерными для подводного вулканизма, присутствуют прослои кремнистых пород. Они приурочены к кровельным частям отдельных потоков, а в базальтовых шаровых лавах слагают каемки вокруг «подушек». Эти породы сформировались во время подводного извержения базальтовых и риолитовых лав в процессе растворения в морской воде оксидов кремния на поверхности горячих лавовых потоков и последующего выпадения хемогенных кремнистых осадков. Последние

претерпели контактовый метаморфизм под воздействием вышележащих лавовых толщ, и превратились в микрокварциты (Беляев, 2013).

Изотопные масс-спектрометрические исследования углеродсодержащего материала, химически извлеченного из микрокварцитов, были проведены в центре изотопных исследований ВСЕГЕИ. Установлено, что углерод сильно деплетирован в отношении тяжелого изотопа ^{13}C ($\delta^{13}\text{C} = -27.1 - -29.5\%$), что характерно для осадочных горных пород, сформировавшихся с участием живого вещества. В данном случае метаморфизованное органическое вещество (графит), очевидно, представлено фоссиллизированными остатками морских планктонных микроорганизмов. Высокие концентрации оксида кремния в морской воде во время подводного извержения базальтовых и риолитовых лав могли приводить к быстрой фоссиллизации (окремнению и ожелезнению) морских планктонных микроорганизмов и их захоронению в хемогенных кремнистых осадках, отлагавшихся на поверхности лавовых потоков.

Впервые в микрокварцитах среди базальтов и риолитов Хогландской свиты найдены структуры по внешней и внутренней морфологии похожие на современные или окаменевшие морские микроорганизмы: спиральные цианобактерии, амёбы, диатомовые водоросли, фораминиферы, жгутиковые, а также многоклеточные организмы. Кроме того, в тесной ассоциации с амёбообразными структурами присутствуют зональные шестиугольные образования по морфологии подобные нуклеокапсидам мими- и мегавирусов. Предполагается, что эти структуры являются микрофоссилиями окремненных и ожелезненных сообществ палеопротерозойских планктонных микроорганизмов, и с их присутствием связано обогащение кремнистых пород лёгким изотопом углерода (Беляев, 2017).

Таким образом, весьма перспективно микропалеонтологическое изучение хемогенно-осадочных кремнистых пород, сформировавшихся в процессах подводного вулканизма, в которых фоссиллизация микроорганизмов могла происходить быстро с сохранением морфологии и деталей внутреннего строения. Новые находки окремненных микрофоссиллий древних эукариот и особенно вирусов могут способствовать расширению представлений о ранней эволюции биосферы. При этом весьма важно, что содержащие микрофоссиллии осадочные кремнистые породы переслаиваются с надежно датированными вулканитами.