

УДК 553.065

## ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ОЛЕДЕНЕНИЙ НА ЗАРОЖДЕНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ В ПРЕДЕЛАХ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА

© 2020 г. А. Е. Мусатов<sup>1, \*</sup>, Г. А. Черкашѐв<sup>1, 2</sup><sup>1</sup>ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup>Институт Наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: alexejmusatov@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.02.2019 г.

После доработки 30.10.2019 г.

Принята к публикации 16.12.2019 г.

Изменение уровня моря в эпохи глобальных оледенений понижает гидростатическое давление на дно океана. Было установлено, что понижение гидростатического давления увеличивает продуктивность магматической активности и, вследствие этого, может способствовать образованию гидротермальных систем [9, 19]. Таким образом, между гляциальными периодами и зарождением гидротермальных систем может существовать временная корреляция. Для проверки гипотезы о связи образования гидротермальных рудообразующих систем с эпохами оледенений было проведено сравнение возрастных <sup>230</sup>Th/U датировок сульфидных руд в северной приэкваториальной зоне Срединно-Атлантического хребта и морских изотопных стадий, отражающих ледниковые и межледниковые периоды. В результате сравнения установлено, что гляциальные периоды совпадают с началом формирования только тех рудных объектов, которые располагаются на базальтах в пределах магматических сегментов Срединно-Атлантического хребта. При этом периоды образования руд, локализованных на тектонических сегментах хребта в пределах внутренних океанических комплексов, сложенных габбро-перидотитами, не проявляют временной связи с оледенениями. Предполагается, что установленное наличие или отсутствие временной корреляции определяется различиями в обстановках формирования сульфидного оруденения в пределах медленно-спрединговых хребтов.

**Ключевые слова:** Срединно-Атлантический хребет, современная гидротермальная активность, морские изотопные стадии, <sup>230</sup>Th/U метод датирования, оледенения в позднем плейстоцене, глубоководные сульфидные руды

DOI: 10.31857/S0030157420030065

### ВВЕДЕНИЕ

Современные океанские гидротермальные рудообразующие системы изучаются в течение многих лет с момента их открытия в Тихом океане в конце 70-х годов XX века. В ходе исследований были установлены главные геологические условия возникновения высокотемпературной деятельности на дне океана. Ключевыми факторами, приводящими к зарождению циркуляционных систем, являются тепло, выделяемое в ходе магматической активности, и тектонические нарушения, которые обеспечивают поставку вещества и энергии к поверхности морского дна [1, 10–13, 18]. Но существуют ли еще силы, которые приводят к началу активизации высокотемпературной гидротермальной деятельности? Возможно, уменьшение гидростатического давления на морское дно при понижении уровня моря в периоды оле-

денений может служить катализатором зарождения гидротермальной деятельности. Во время глобальных оледенений уровень моря понижается и, следовательно, сила гидростатического давления также уменьшается. По разным оценкам уровень моря мог понижаться от 70 до 150 м в зависимости от мощности оледенения [25]. При уменьшении объема воды в океане в эпохи похолодания давление на океаническую кору и верхнюю мантию уменьшается. Зафиксировано, что в эти эпохи происходит усиление магматической активности [9]. Предполагается, что эта же причина может приводить и к образованию гидротермальных систем [19]. Эта версия подтверждается наличием корреляции морских изотопных стадий (МИС), фиксирующих этапы потепления и похолодания, и временных отрезков гидротермальной активности, выделенных по результатам изучения колонок донных осадков вблизи гидротермаль-

**Таблица 1.** Характеристика рудных полей, МИС и уровень моря, соответствующие началу их формирования

Название полей	Вмещающие породы	Возраст $^{230}\text{Th}/\text{U}$ , макс, тыс. л.	МИС	Уровень моря м
Ашадзе 1	Г/П	7	1 (I)	-20
Логачёв 2	Г/П	7	1 (I)	-20
Семёнов 5	Г/П	8	1 (I)	-20
Пью-де-Фолль	Б	18	2 (G)	-125
Ашадзе 2	Г/П	27	2 (G)	-105
Семёнов 1	Г/П	37	3a (I)	-85
Логачёв 1	Г/П	58	4 (G)	-90
Зенит-Виктория	Б	60	4 (G)	-100
Ашадзе 4	Б + Г/П	63	4 (G)	-100
Ириновское	Г/П	69	4 (G)	-90
Семёнов 2	Г/П	76	4 (G)	-60
Семёнов 3	Г/П	90	5b (G)	-60
Сюрприз	Б	102	5d (G)	-50
Юбилейное	Б	110	5d (G)	-70
Краснов	Б	119	5e (I)	-20
Семёнов 4	Г/П	124	5e (I)	0
Победа 1	Г/П	177	6d (I)	-80
Петербургское	Б	223	7d (G)	-80

Примечание. Г/П – габбро-перидотиты, Б – базальты; I – межледниковый период, G – ледниковый период.

ных полей. По данным [15, 19–22] пики гидротермальной активности, выраженные в наличии прослоев металлоносных осадков Восточно-Тихоокеанского поднятия, Срединно-Атлантического хребта (САХ) и хребта Карлсберг (северо-западная часть Индийского океана), примерно соответствуют двум последним эпохам похолодания (20 и 60 т. л. н.). В дополнение к данным по металлоносным осадкам было проведено сравнение датировок сульфидных руд САХ, отражающих этапы активизации гидротермальной деятельности, с морскими изотопными стадиями, которые фиксируют теплые и холодные периоды в позднем плейстоцене. В случае наличия связи между оледенениями и гидротермальной деятельностью на дне океана должна существовать корреляция между МИС и периодами зарождения гидротермальных систем, которые можно оценить по наиболее ранним датировкам сульфидов в пределах гидротермальных руд. Проверке данной гипотезы, предварительные результаты которой были представлены на конференции Underwater Mining Conference [8], посвящена данная статья.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы сульфидных руд были отобраны в северной приэкваториальной зоне САХ на участке Российского Разведочного Района (PPP) сотруд-

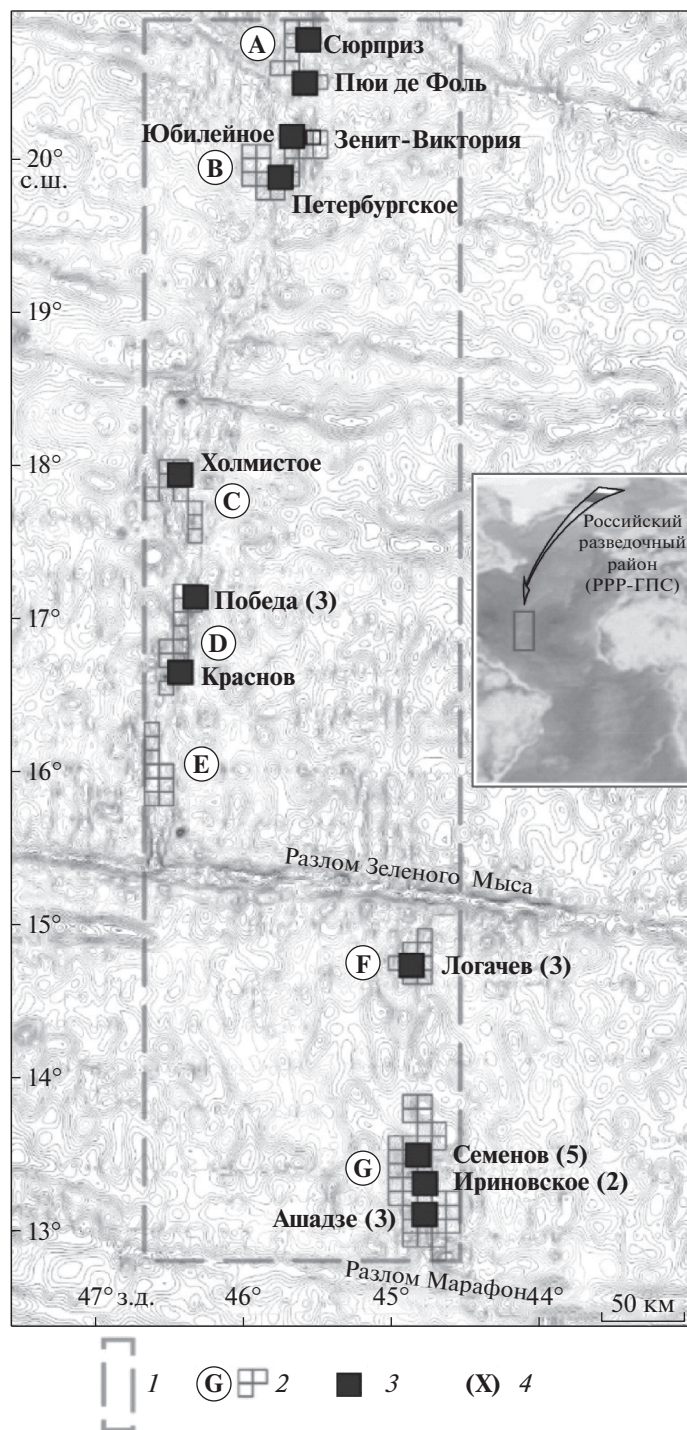
никами АО ПМГРЭ и ФГБУ ВНИИОкеангеология в ходе рейсов НИС “Профессор Логачев” (рис. 1).

Результаты датирования 198 образцов сульфидных руд  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  методом приведены в работе [7], где сделаны выводы об отсутствии корреляции этапов активизации гидротермальной деятельности в пределах различных полей и о формировании каждого рудного поля по своему собственному сценарию.

Для сравнения возраста рудных отложений с данными по колебаниям уровня моря выбраны самые древние датировки для каждого поля, по предположению отражающие время зарождения гидротермальных рудообразующих систем. Данные изотопных датировок сульфидных руд приведены в табл. 1 в порядке возрастания.

## Морские изотопные стадии

Морские изотопные стадии используются для выделения теплых и холодных этапов в плейстоцене, их выделение основывается на соотношениях между изотопами кислорода  $\text{O}^{16}$  и  $\text{O}^{18}$ , которые отображают изменения климатических условий. Параметр  $\delta^{18}\text{O}$  (отношение изотопов кислорода  $\text{O}^{18}$  к  $\text{O}^{16}$ ) изменяется в зависимости от интенсивности покровного оледенения на планете. Высокие значения  $\text{O}^{18}$  отвечают эпохам глобального оледенения, а низкие значения  $\text{O}^{18}$  и вы-



**Рис. 1.** Российский Разведочный Район и рудные объекты в его пределах.

1 – граница РРР; 2 – разведочные блоки; 3 – рудные узлы и поля в пределах разведочных блоков; 4 – количество рудных полей в пределах рудных узлов [4].

сокие значения  $O^{16}$  – межледниковым периодам в истории Земли [24]. Таким образом, параметр  $\delta^{18}O$  используется для определения периодов потеплений и похолоданий. Шкала МИС показала свое соответствие не только с астрономическими

данными цикла Миланковича [17], но и с датировками по радиоуглеродному и  $^{230}Th/U$  методу [5]. На основании вышесказанного МИС и датировки сульфидных руд  $^{230}Th/U$  методом возможно сопоставлять между собой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Сравнение возраста сульфидных руд и морских изотопных стадий**

Судя по имеющимся датировкам, образование гидротермальных руд в Северной приэкваториальной Атлантике происходило в последние 230 тыс. л. (табл. 1). Во время данного временного интервала в позднем плейстоцене сменилось 7 морских изотопных стадий (табл. 2).

При сравнении возрастных датировок сульфидных руд и МИС установлено, что временная связь с гляциальными максимумами отмечается только для части рудных полей (рис. 2).

Время начала образования рудных полей, связанных с базальтовыми породами, примерно соответствует гляциальным максимумам за исключением поля Краснов (120 тыс. л. н.), в то время как поля, связанные с ультраосновными комплексами, не показывают четкой корреляции ни с гляциальными максимумами, ни с минимумами, но большинство полей этого типа формировались в периоды времени, когда уровень океана был ниже современного (табл. 1).

**Гидротермальная активность и изменения уровня моря**

Возможная временная связь между гидротермальной активностью и гляциальными периодами в позднем плейстоцене связана с изменениями уровня моря и глобальным уменьшением количества открытого льда на планете. Начало образования ряда гидротермальных рудных объектов в пределах РРР совпадает с временными отрезками развития оледенений на поверхности Земли. Возможная положительная или отрица-

**Таблица 2.** Морские изотопные стадии за последние 250 тыс. лет по [23]

МИС	Время начала МИС (тыс. л. н.)	Подстадии МИС				
		межледниковье/оледенение				
		I	G	I	G	I
1	11	1				
2	24		2			
3	60	3a	3b	3c		
4	74		4			
5	130	5a	5b	5c	5d	5e
6	190	6a	6b	6c	6d	6e
7	244	7a	7b	7c	7d	7e

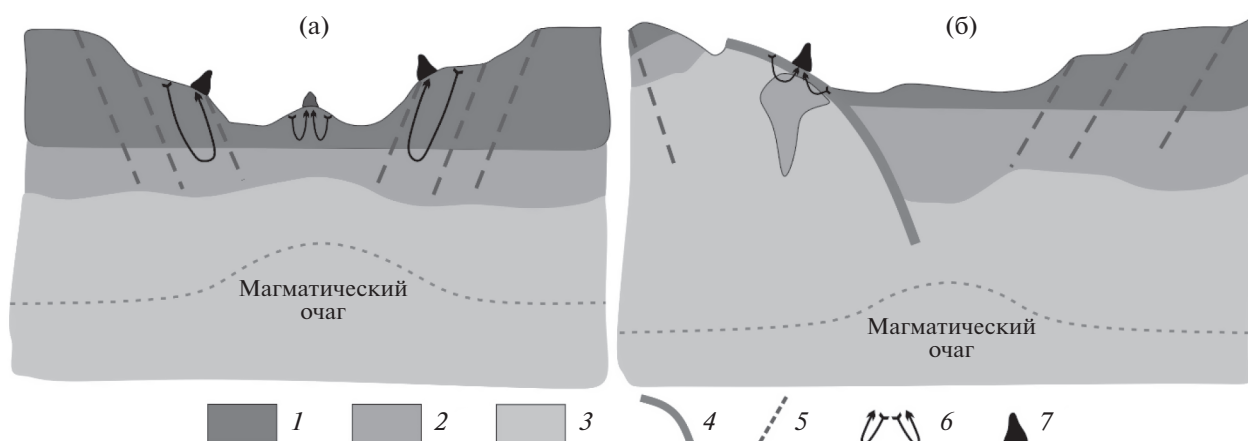
Примечание. I – межледниковый период, G – ледниковый период.

тельная корреляция начала образования гидротермальной деятельности и уменьшения уровня моря связана с различным магматическим бюджетом и различными вмещающими породами в пределах сегментов рифтовых зон – базальтами и габбро-перидотитами внутренних океанических комплексов [4].

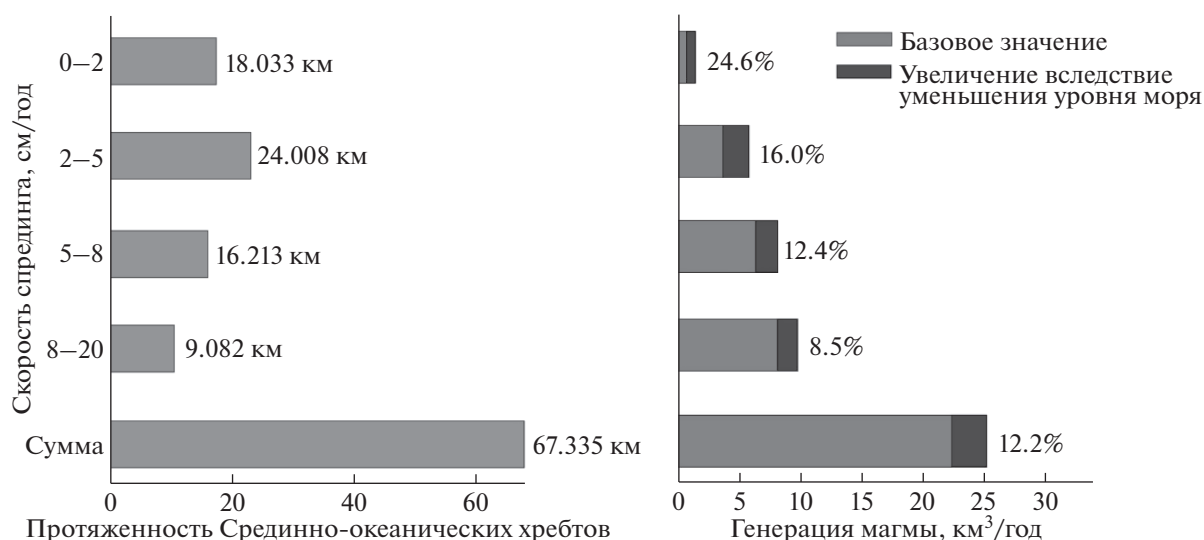
Гидротермальная активность, связанная с базальтами, формируется при высоком магматическом бюджете и проявляется на неовулканических поднятиях или фланговых зонах рифтовых долин. В пределах внутренних океанических комплексов гидротермальные системы всегда приурочены к бортам рифтовой долины, образуются при низком магматическом бюджете и связаны с глубоко проникающими разломными зонами



**Рис. 2.** Морская изотопно-кислородная шкала по [21, 23], отражающая эпохи похолодания и потепления, и датировки сульфидных руд, фиксирующих начало гидротермальной деятельности. Названия полей и их возрастные характеристики приведены в табл. 1. Цифрами на шкале обозначены морские изотопные стадии и подстадии. 1 – поля, связанные с ультраосновными породами; 2 – поля, связанные с основными породами.



**Рис. 3.** Схематическая модель расположения и образования сульфидных руд по [12] с изменениями. Рудные тела, связанные с базальтами (а) и с габбро-перидотитами (б). 1 – базальты и долериты; 2 – габброиды; 3 – мантийные ультрамафиты; 4 – глубинный разлом (детачмент); 5 – сбросовые нарушения; 6 – циркуляционная система; 7 – гидротермальные сульфидные отложения.



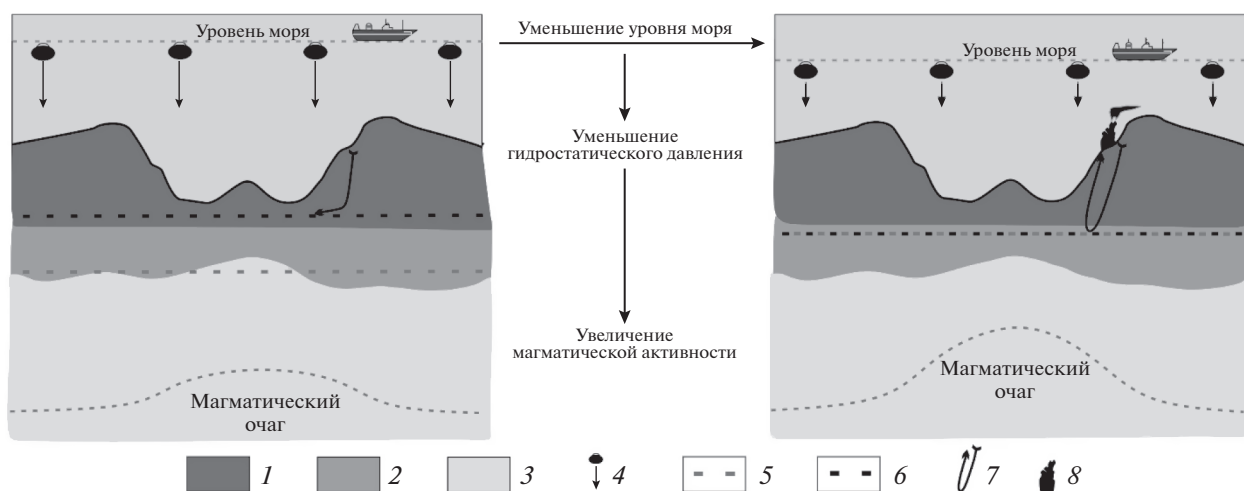
**Рис. 4.** Результаты математического моделирования влияния уменьшения уровня моря на 60 м на магмогенерацию в пределах Срединно-океанических хребтов [16].

(детачментами), вдоль которых происходит подъем пород габбро-перидотового состава на поверхность морского дна (рис. 3).

Уменьшение уровня моря в течение ледниковых периодов понижает давление в верхних частях мантии, что, в свою очередь, возможно, приводит к магматической активности в пределах океанических хребтов [9]. По результатам математического моделирования влияния уменьшения давления вследствие изменений уровня Мирового океана на магматическую активность сделан вывод об увеличении магмогенерации в периоды понижения уровня моря, при этом боль-

ший вклад уменьшение давления оказывает именно на медленных и ультрамедленных океанических хребтах (рис. 4).

Увеличение магматической активности в свою очередь “запускает” систему рециклинга [26, 27]. Таким образом, изменения уровня моря во время оледенений могли приводить к зарождению гидротермальных систем. Периоды формирования рудных полей, расположенных в пределах магматических сегментов [14] и образованных при высоком магматическом бюджете на базальтовых породах, совпадают с гляциальными максимумами, в то время как для полей, связанных с текто-



**Рис. 5.** Схематическая модель образования гидротермальной системы при изменении уровня Мирового океана во время глобальных оледенений.

1 – базальты и долериты; 2 – габброиды; 3 – мантийные ультрамафиты; 4 – гидростатическое давление; 5 – температурная зона трансформации нисходящей ветви в восходящую; 6 – уровень проницаемости пород, достаточный для циркуляции; 7 – активная гидротермальная система; 8 – гидротермальные сульфидные отложения.

ническими сегментами и внутренними океаническими комплексами, такой прямой временной связи не наблюдается (рис. 2). По всей видимости связь оледенений и гидротермальной активности в условиях высокого магматического бюджета помимо ультрамедленных и медленно-спрединговых хребтов должна существовать и в пределах областей высоких скоростей спрединга. Косвенно это подтверждается корреляцией пиков гидротермальной активности в металлоносных осадках Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП) и оледенения во время последнего гляциального максимума [20, 21]. Возможно, что влияние изменения давления на возникновение гидротермальной деятельности на дне океана в пределах быстроспрединговых хребтах меньше, чем на медленных. Дальнейшее изучение и сравнение этапов активизации гидротермальной активности в пределах САХ и ВТП поможет проверить гипотезу о влиянии оледенений на возникновение гидротермальной деятельности на дне океанов.

Понижение давления на дно океана, помимо увеличения магматической активности, также должно увеличивать проницаемость пород с глубиной [3]. Таким образом, в периоды глобальных оледенений морская вода может глубже проникать в недра океанических пород. Для образования стабильной циркуляционной системы необходимо движение флюида как в нисходящей, так и в восходящей ветви [2, 6]. Для этого необходимо, чтобы раствор мог разогреться до температуры, при которой он, достигнув критической точки, начал движение к поверхности дна. В случае повышенного гидростатического давления и по-

ниженной проницаемости вмещающих пород раствор не будет нагреваться до температур, необходимых для формирования восходящей ветви. При уменьшении давления вследствие изменения уровня моря вода может достигать критической температуры, необходимой для трансформации нисходящей ветви гидротермальной системы в восходящую. При совпадении уровня температурной зоны трансформации и уровня проницаемости пород, достаточного для циркуляции гидротермальных флюидов, возможно зарождение и относительно длительное поддержание гидротермальной активности (рис. 5).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уменьшение гидростатического давления на дно океана может увеличивать продуктивность магматических процессов, инициирующих циркуляционные гидротермальные системы. Это подтверждается корреляцией между началом зарождения руд гидротермальных полей, связанных с базальтовыми породами, и гляциальных периодов. Таким образом, уменьшение гидростатического давления может провоцировать зарождение гидротермальных систем, а изменение уровня моря в ходе глобальных оледенений является катализатором активизации гидротермальной деятельности на дне океана.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность В.Ю. Кузнецову (СПбГУ) за определение возраста сульфидных руд и сотрудникам океанской поисково-съёмочной партии (АО ПМГРЭ) за предоставленный рудный материал.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидротермальные сульфидные руды и металлоносные осадки океана. СПб.: Недра, 1992. 278 с.
2. Гречук Д.В. Термодинамические модели субмаринных гидротермальных систем. М.: Научный мир, 2000. 304 с.
3. Мироненко В.А. Динамика подземных вод: Учебник для вузов — 5-е издание, стереотипное. М.: Горная книга и изд-во Московского горного университета, 2009. 519 с.
4. Мировой океан. Т. 3. Твердые полезные ископаемые и газовые гидраты в океане. М.: Научный мир, 2018. 708 с.
5. Andersen M.B., Stirling C.H., Potter E.K. et al. High-precision U-series measurements of more than 500,000 year old fossil corals // *Earth and Planetary Science Letters*. 2008. V. 265. P. 229–245.
6. Becker R., Langseth M.G., Von Herzen R.P., Anderson R.N. Deep crustal geothermal measurements. Hole 504B. Costa Rica Rift // *J. of Geoph. Res.* 1983. V. 88. P. 3447–3457.
7. Cherkashov G., Kuznetsov V., Kuksa K. et al. Sulfide geochronology along the Northern Equatorial Mid-Atlantic Ridge // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 87. P. 147–154.
8. Cherkashov G., Musatov A. Hydrothermal activity, sea level and glaciation: evidence of correlation from the Atlantic SMS deposits. Underwater Mining Conference // *Deep-Sea Mining: Challenges of Going Further and Deeper Advances in Marine Research and Subsea Technology Beyond Oil & Gas*. 2018. Norway. Bergen.
9. Crowley J. W., Katz R. F., Huybers P. et al. Glacial cycles drive variations in the production of oceanic crust // *Science*. 2015. V. 347. Iss. 6227. P. 1237–1240.
10. de Martin B. J., Sohn R. A., Canales J.B., Humphris S.E. Kinematics and geometry of active detachment faulting beneath the Trans-Atlantic Geotraverse (TAG) hydrothermal field on the Mid-Atlantic Ridge // *Geology* 2007. V 35. № 8. P. 711–714.
11. Escartín J., Smith D. K., Cann J. et al. Central role of detachment faults in accretion of slow-spreading oceanic lithosphere // *Nature*. 2008. V. 455. № 7214. P. 790–794.
12. Fouquet Y., Cambon P., Etoubleau J. et al. Geodiversity of hydrothermal processes along the Mid-Atlantic Ridge and ultramafic hosted mineralization: a new type of oceanic Cu–Zn–Co–Au volcanogenic massive sulfide deposit // *Diversity of submarine hydrothermal systems on slow spreading ocean ridge*. 2010. Geophysical Monograph Series. V. 188. P. 297–320.
13. German C.R., Parson L.M. Hydrothermal activity on the Mid-Atlantic Ridge: an interplay between magmatic and tectonic processes // *Earth Planetary Science Letter*. 1998. V. 160. P. 327–341.
14. German C.R., Petersen S., Hannington M.D. Hydrothermal exploration of mid-ocean ridges: Where might the largest sulfide deposits be forming? // *Chemical Geology*. 2016. V. 420. P. 114–126.
15. Han X., Fan W., Cai Y., Li M. Extreme hydrothermal activity on Carlsberg Ridge during the last glacial stage: evidence from an off-axis sediment core // *Workshop on Hydrothermal ore-forming processes and the fate of SMS deposits along slow and ultraslow spreading MOR*. 2019. China. Hangzhou.
16. Hasenclever J., Knorr G., Rüpke L.H. et al. Sea level fall during glaciation stabilized atmospheric CO<sub>2</sub> by enhanced volcanic degassing // *Nature Communication* 2017. V. 8.
17. Imbrie J., Hays J.D., Martinson D.G. et al. The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine δ<sup>18</sup>O record. Milankovitch and Climate: Understanding the Response to Astronomical Forcing. / Berger A. et al. Dordrecht: D. Reidel Publishing, 1984. P. 269–305.
18. Lowell R.P., Farough A., Hoover J., Cummings K. Characteristics of magma-driven hydrothermal systems at oceanic spreading centers // *Geochemistry. Geophysics. Geosystems*. 2013. V. 12. № 6. P. 14.
19. Lund D.C., Asimow P.D. Does sea level influence mid-ocean ridge magmatism on Milankovitch timescales? // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2011. V. 12. № 12. P. 1–26.
20. Lund D.C., Asimow P.D., Farley K.A. et al. Enhanced hydrothermal activity along the East Pacific Rise during the last two glacial terminations // *Science*. 2016. V. 351. Is. 6272. P. 478–482.
21. Middleton J.L., Mukhopadhyay S., Mcmanus J.F., Langmuir C.H. Last glacial maximum and hydrothermal sediment fluxes on the Mid-Atlantic ridge // *Goldschmidt*. 2015. Abstracts 2123.
22. Middleton J.L., Langmuir C.H., Sujoy Mukhopadhyay S. et al. Hydrothermal iron flux variability following rapid sea level changes // *Geoph. Res. Letters*. V. 43. 2016. P. 3848–3856.
23. Railsback L.B., Gibbard P.L., Head M.J. et al. An optimized scheme of lettered marine isotope substages for the last 1.0 million years, and the climatostratigraphic nature of isotope stages and substages // *Quaternary Science Reviews*. V. 111. P. 94–106.
24. Shackleton N.J. The last interglacial in the marine and terrestrial record // *Proceedings of the Royal Society of London*. 1969. B. 174. P. 135–154.
25. Spratt R.M., Lisiecki L.E. A Late Pleistocene sea level stack // *Climate of the Past*. 2016. V. 12. P. 1079–1092.
26. Von Damm K.L., Oosting S.E., Kozłowski R. et al. Evolution of East Pacific Rise hydrothermal vent fluids following a volcanic eruption // *Nature*. 1995. V. 375. № 6526. P. 47–50.
27. Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Lisitsin A.P. et al. Tectonics of the Mid-Atlantic rift valley between the TAG and MARK areas (26–24° N): Evidence for vertical tectonism // *Tectonophysics*. 1989. V. 159 (1–2). P. 1–23.

## Influence of Global Glaciation on the Origin of the Hydrothermal Activity Within Mid–Atlantic Ridge

A. E. Musatov<sup>a, #</sup>, G. A. Cherkashov<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>*VNIIOkeangeologia, Saint Petersburg, Russia*

<sup>b</sup>*Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: alexejmusatov@yandex.ru*

Sea level changes during of the glacial periods on the Earth reduce hydrostatic pressure on the ocean bottom. The decrease of the hydrostatic pressure increase the produce of magmatic activity and, as a result, it could lead to forming hydrothermal systems [9, 19]. Thus, it is possible correlation between glacial periods and origin of the circulation hydrothermal systems. To test the hypothesis about the relationship between the formation of hydrothermal systems and the glacial periods, we compared the <sup>230</sup>Th/U age dates of sulfide ores in the northern near equatorial zone of the Mid-Atlantic Ridge and marine isotopic stages, which reflecting the glacial and interglacial periods. The comparison show that the glacial periods coincide with the beginning of the formation of only ore objects, which are associated with basalts within the magmatic segments of the Mid-Atlantic Ridge. Contrariwise, the periods of formation of ore objects associated with tectonic segments of the ridge within the ocean oceanic complexes do not show connection with glaciation. We assume that connection between glaciations and origin of hydrothermal systems is determined by differences in the geological conditions for the formation seafloor massive sulfides within slow-spreading ridges.

**Keywords:** Mid-Atlantic Ridge, modern hydrothermal activity, marine isotope stages, <sup>230</sup>Th/U dating, Late Pleistocene glaciations, seafloor massive sulphides