

*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 deposits // Diversity of hydrothermal systems on slow spreading ocean ridges. Rona P.A., Devey C.W., Dymont J., Murton B.J. (Eds.) AGU Geophys. Monograph, 2010. P. 321–368.

*MacLeod C.J., Searle R.C., Murton B.J. et al.* Life cycle of oceanic core complexes // Earth and Planetary Science Letters. 2009. Vol. 287. P. 333–344.

*Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., et al.* Tellurium-bearing minerals in zoned sulfide chimneys from Cu-Zn massive sulfide deposits of the Urals, Russia // Mineralogy and Petrology. 2013. Vol. 107. P. 67–99.

*Melekestseva I.Yu., Tret'yakov G.A., Nimis P. et al.* Barite-rich massive sulfides from the Semenov-1 hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge, 13°30.87' N): Evidence for phase separation and magmatic input // Marine Geology. 2014. Vol. 349. P. 37–54.

*Melekestseva I., Maslennikov V., Safina N. et al.* Sulfide breccias from the Semenov-3 hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge: authigenic mineral formation and trace element pattern // Minerals. 2018. Vol. 8(8). P. 321.

*Melekestseva I.Yu., Maslennikov V.V., Tret'yakov G.A. et al.* Gold- and silver-rich massive sulfides from the Semenov-2 hydrothermal field, 13°31.13' N, Mid-Atlantic Ridge: A case of magmatic contribution? // Economic Geology. 2017. Vol. 112. P. 741–773.

*Nayak B., Halbach P., Pracejus B., Münch U.* Massive sulfides of Mount Jourdan along the super-slow spreading Southwest Indian Ridge and their genesis // Ore Geology Reviews. 2014. Vol. 63. P. 115–128.

**К.А. Кукса**

*Санкт-Петербургский государственный университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
katerina.kuksa@spbu.ru*

**Оценка количества взвеси материала гидротермального плюма  
в металлоносных осадках рудного узла Семенов  
(Срединно-Атлантический хребет)**

**К.А. Кукса**

*St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia*

**Estimation of the amount of plume particulates in metalliferous sediments from  
the Semenov hydrothermal sulfide cluster (Mid-Atlantic Ridge)**

**Abstract.** Mineralogical and geochemical features of three cores of proximal metalliferous sediments from the Semenov hydrothermal sulfide cluster were studied in order to decipher the evolution of fluid discharge. Iron has a dual origin in core sediments: from hydrothermal plume fallout and mass-wasted sulfide deposits. A novel approach of quantitatively assess the relative amount of plume fallout matter allowed us to reconstruct the temporal variations of hydrothermal activity within the Semenov-1, 2 and 4 fields, which lasted permanently for about ~43 kyr with varying intensity.

Металлоносные осадки, ассоциирующие с современными гидротермальными системами, являются важнейшими хранителями летописи истории гидротермальной деятельности. В то время как результаты изучения сульфидных руд, формирующихся вокруг зон разгрузки гидротермального флюида, позволяют восстанавливать лишь отдельные эпизоды, исследование колонок металлоносных осадков дает возможность расшифровать «непрерывную запись»

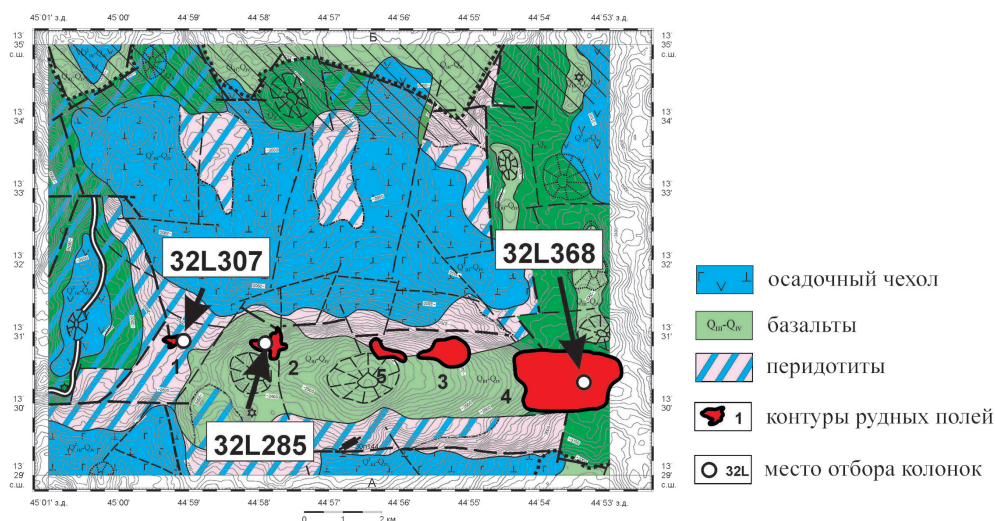


Рис. 1. Положение станций с изученными колонками в гидротермальном сульфидном узле Семенов.

гидротермальных событий и использовать полученную информацию для реконструкции эволюции гидротермальной системы во времени. В настоящей работе представлены результаты минералогического и геохимического изучения трех колонок проксимальных металлоносных осадков рудного узла Семенов, расположенного на Срединно-Атлантическом хребте в районе  $13^{\circ}30'$  с.ш. с целью восстановления истории гидротермальной деятельности в пределах отдельных рудных полей.

Рудный узел состоит из пяти гидротермальных полей: Семенов-1, 2, 3, 4 и 5. Все поля, за исключением Семенов-4, локализованы в пределах внутреннего океанического комплекса, сложенного серпентинизированными перидотитами и редкими габброидами, на который наложены выходы пиллоу-лав [Перцев и др., 2012]. С поверхности комплекса также драгированы долериты, апобазальтовые тальк-хлоритовые метасоматиты, апосерпентинитовые талькиты, амфиболиты, плагиограниты, диориты и тоналиты. В пределах гидротермальных полей развиты проксимальные металлоносные осадки, а на прилегающей с севера к рудному узлу террасе – дистальные, сложенные преимущественно карбонатным материалом.

Три колонки проксимальных осадков мощностью 55 см отобраны в пределах полей Семенов-1 (32L307), Семенов-2 (32L285) и Семенов-4 (32L368) (рис. 1). Осадки представлены бурыми, рыжими и бежевыми карбонатными илами, в которых встречаются горизонты отложений песчаной или песчано-дресвяной размерности [Бельтнев и др., 2010]. Карбонатная часть осадков сформирована раковинами фораминифер; в них встречаются также минералы гидротермального генезиса – пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит, изокубанит, атакамит, барит и оксигидроксиды Fe (рис. 2). Гидротермальные образования часто представлены сростками нескольких разных по составу минералов, что типично для продуктов разрушения рудных построек [Kuksa et al., 2021].

Химический состав осадков был определен методом ИСП-МС. Их карбонатность варьирует от 8 до 38 %, наиболее высокие содержания  $\text{CaCO}_3$  характерны для колонки 32L307 (в среднем, 30 %), а наименьшие – для колонки 32L368 (в среднем, 10 %). Содержание  $\text{Fe}_{\text{окв}}$  варьирует от 2 до 50 % и испытывает значительные колебания по глубине всех трех колонок. Концентрации Cu, Zn и Pb колеблются в диапазоне 0.004–1.1 %  $\text{Cu}_{\text{окв}}$ , 0.007–0.25 %  $\text{Zn}_{\text{окв}}$  и 4.5–330 г/т  $\text{Pb}_{\text{окв}}$ .

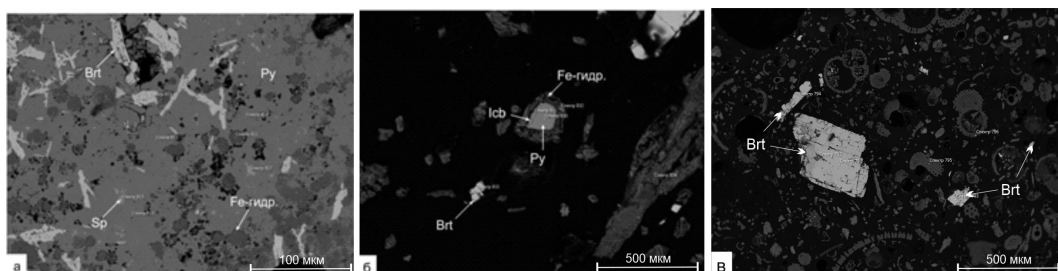


Рис. 2. Минеральный состав проксимальных осадков рудного узла Семенов.

Fe-гидр. – оксигидроксиды железа, Brt – барит, Py – пирит, Isb – изокубанит, Sp – сфалерит. BSE-фото.

Несмотря на сходство в поведении Cu, Zn и Pb в ходе взаимодействия гидротермального флюида с морской водой (преимущественное вхождение в сульфидные минералы), только Pb в изученных осадках образует линейные тренды относительно Fe, которые характеризуются постоянным, но различным отношением Pb/Fe (рис. 3). Так, для осадков полей Семенов-1 и -4 (за исключением нижних горизонтов) типично среднее молярное отношение Pb/Fe  $\sim 5.5 \cdot 10^{-5}$ . Эта величина несколько превышает отношение данных элементов в сульфидных рудах поля Семенов-1 –  $\sim 5.5 \cdot 10^{-5}$  (рассчитано по данным [Melekestseva et al., 2014]), однако меньше их среднего отношения во взвеси вещества гидротермального плюма (Pb/Fe =  $15.5\text{--}17.2 \cdot 10^{-5}$  рассчитано по данным [Edmonds, German, 2004] и [German et al., 1991]). В то же время, в осадках поля Семенов-2 величина Pb/Fe значительно выше ( $\sim 17$ ) и близка к отношению данных элементов в рудах соответствующего поля –  $\sim 19.6 \cdot 10^{-5}$  (рассчитано по данным [Мелекесцева, 2011]). Это позволяет предполагать, что преобладающие механизмы поступления металлов в проксимальные осадки разных полей рудного узла Семенов были различны: для осадков поля Семенов-2 и нижних горизонтов поля Семенов-4 преобладающим было переотложение материала рудных сульфидных построек. В то же время для осадков полей Семенов-1 и верхних горизонтов Семенов-4 логично допустить смешение взвеси гидротермального плюма и обломочного сульфидного материала в приблизительно равных пропорциях.

Чтобы количественно оценить соотношение в осадках обломочного сульфидного материала и взвеси вещества гидротермального плюма, мы использовали оригинальную методику, описанную в работе [Kuksa et al., 2023]. Состав фоновых пелагических илов Атлантического океана был аппроксимирован средним составом осадков колонки BOFS 22#6M/23#12M [Cave et al., 2002]. Влияние состава подстилающих пород оценено на основе элементного состава перидотита 32L242-5, отобранного в пределах рудного узла [Бельтнев и др., 2010]. Учет доли вещества взвеси гидротермального плюма в осадках трех исследуемых колонок проводился по величине V/Fe отношения в плюме поля Рейнбой [Edmonds, German, 2004] и данным по химическому составу массивных сульфидных руд полей Семенов-1, -2 и -4 [Бельтнев и др., 2010; Мелекесцева, 2011; Melekestseva et al., 2014].

Расчеты показали, что, в среднем, относительное количество в осадках взвеси гидротермального плюма составляет  $\sim 31$ ,  $43$  и  $11$  % для колонок 32L307 (Семенов-1), 32L285 (Семенов-2) и 32L368 (Семенов-4), соответственно, и значительно варьирует по глубине (рис. 4). Приведенные в работе [Бич, 2024] оценки средней скорости осадконакопления в дистальных осадках рудного узла Семенов ( $1.17 \pm 0.10$  см/тыс. лет) позволили рассчитать временные вариации изменения количества вещества взвеси плюма для гидротермального поля Семенов-1. Установлено, что от  $\sim 45$  до  $\sim 25$  тыс. лет гидротермальная деятельность была относительно стабильной, затем последовало резкое усиление активности, максимум которой фиксируется

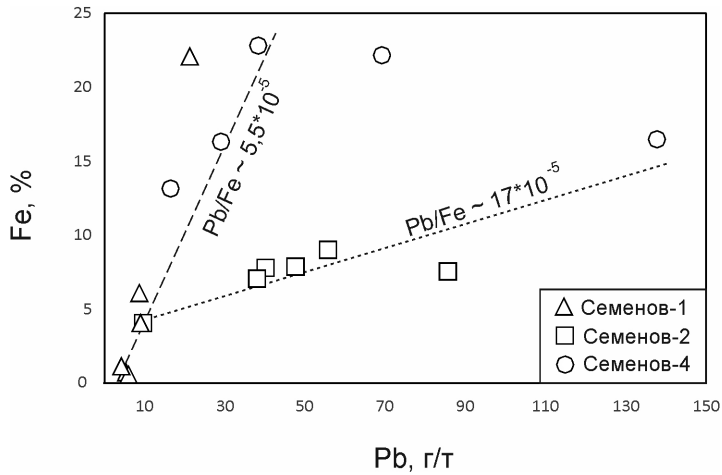


Рис. 3. Соотношение Fe и Pb в проксимальных металлоносных осадках рудного узла Семенов.

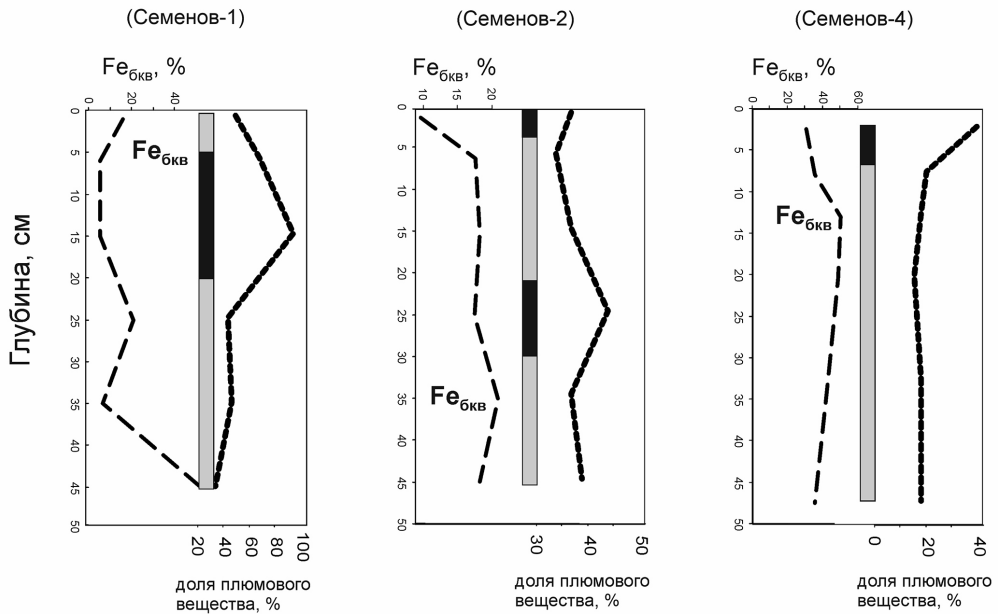


Рис. 4. Распределение бескарбонатного железа ( $Fe_{бкв}$  – пунктирная линия) и расчетной доли плюмового вещества (в %, сплошная линия) по глубине колонок гидротермальных полей Семенов-1, 2 и 4.

Для поля Семенов-1 глубина в см соответствует возрасту в тыс. лет. Серой жирной линией показаны периоды относительного ослабления, а черной – усиления гидротермальной деятельности.

в период ~15 тыс. лет. В дальнейшем она опять пошла на спад и в настоящее время полностью загухла. Для поля Семенов-2 в возрастном интервале от <45 тыс. лет и вплоть до настоящего времени предполагается стабильная гидротермальная разгрузка с незначительным усилением в отдельные периоды. Для поля Семенов-4 также можно предполагать непрерывную гидротермальную деятельность в интервале от <45 тыс. лет, сопровождавшуюся усилением разгрузки в самом недавнем времени.

Таким образом, разработанный нами оригинальный способ учета доли обломочного материала сульфидных руд позволяет использовать проксимальные металлоносные осадки для корректной реконструкции истории гидротермальной деятельности отдельных рудных полей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 13.10.2022 № 075-15-2022-1220).*

## Литература

*Бельтнев В.Е. и др.* Геолого-геофизические исследования с целью выделения участков, перспективных на ГПС, в осевой зоне САХ (в пределах 11°–12°30' с.ш.) и поисковые работы на участке 13°31' с.ш. Ломоносов, Фонды ФГУНПП «ПМГРЭ», 2010.

*Бич А.С.* Распространение и накопление металлов в донных осадках района рудного узла Семенов, 13°30' с.ш., Срединно-Атлантический хребет // *Металлогения древних и современных океанов-2024. Рудогенез. Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 2024. (настоящий сборник).*

*Мелекесцева И.Ю.* Минеральный и химический состав руд гидротермального поля Семенов-2 // *Разведка и охрана недр. 2011. № 12. С. 10–16.*

*Перцев А.Н., Бортников Н.С., Власов Е.А. и др.* Современные колчеданные залежи рудного района Семенов (Срединно-Атлантический хребет, 13°31' с.ш.): характеристика ассоциирующих пород внутреннего океанического комплекса и их гидротермальных изменений // *Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54. № 5. С. 400–415.*

*Чернышев И.В., Бортников Н.С., Чугаев А.В. и др.* Масштаб вариаций и гетерогенность изотопного состава свинца в сульфидах гидротермальных полей Срединно-Атлантического хребта по данным высокоточного MC-ICP-MS-метода изотопного анализа // *Доклады Академии наук. 2011. Т. 437. № 5. С. 680–685.*

*Cave R., German C.R., Thompson J. et al.* Fluxes to sediments underlying the Rainbow hydrothermal plume at 36°14'N on the Mid-Atlantic Ridge // *Geochimica Cosmochimica Acta. 2002. Vol. 66. P. 1905–1923.*

*Edmonds H.N., German C.R.* Particle geochemistry in the Rainbow hydrothermal plume, Mid-Atlantic Ridge // *Geochimica et Cosmochimica Acta. 2004. Vol. 68. P. 759–772.*

*German C.R., Campbell A.C., Edmond J.M.* Hydrothermal scavenging at the Mid-Atlantic Ridge: Modification of trace element dissolved fluxes // *Earth and Planetary Science Letters. 1991. Vol. 107. № 1. P. 101–114.*

*Kuksa K., Cherkashov G., Bich A. et al.* Temporal evolution of the Pobeda hydrothermal site (MAR): Utility of proximal sediment cores // *Chemical Geology. 2023. Vol. 628. #121477.*

*Kuksa K., Bich A., Cherkashov G. et al.* Mass-wasting processes input in proximal metalliferous sediments: a case study of Pobeda hydrothermal cluster // *Marine Geology. 2021. Vol. 438. #106517.*

*Melekestseva I.Yu., Tret'yakov G.A., Nimis P. et al.* Barite-rich massive sulfides from the Semenov-1 hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge, 13°30.87' N): Evidence for phase separation and magmatic input // *Marine Geology. 2014. Vol. 349. P. 37–54.*