

УДК 551.242+553.041

## ЭВОЛЮЦИЯ МАГМАТИЗМА И ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ЗАПАДНОЙ АРКТИКЕ И СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

© 2016 г. Н. О. Сорохтин, Л. И. Лобковский, Г. В. Новиков,  
Н. Е. Козлов, О. Ю. Богданова, С. Л. Никифоров

*Институт океанологии им. П.П. Шишова, Москва*

*e-mail: nsorokhtin@mail.ru*

Поступила в редакцию 23.06.2015 г.

После доработки 28.09.2015 г.

В статье рассматриваются вопросы геодинамической эволюции литосферы Арктического региона в фанерозое и их полистадийной структурно-вещественной организации. Приводятся пространственно-временные закономерности мозаичного сочленения разновозрастных литосферных плит континентального типа в каледоно-герцинский этап развития и формирования океанического бассейна северной Атлантики и Северного Ледовитого океана в кайнозое. Описываются условия образования систем разрывных нарушений различной кинематики в узлах, пересечения которых проявлен специфический магматизм, определяющий образование целого ряда месторождений полезных ископаемых. Показано, что гидротермальная активность региона связана в основном с процессами раскрытия океана в эоцене и приурочена к срединно-океаническому хребту.

DOI: 10.7868/S0030157416030205

Локализация рудного вещества в земной коре и формирование месторождений полезных ископаемых тесно связано с закономерностями глубинной эволюции Земли, поверхностным отражением которой является дрейф литосферных плит. Их взаимодействие друг с другом, выраженное с одной стороны в расколе и раздвиге литосферы, а с другой в пододвигании (субдукции) одной плиты под другую и их коллизии, тесно связано с формированием целого ряда эндогенных и экзогенных полезных ископаемых. При этом рудоконтролирующим фактором чаще всего являются полистадийные процессы структурирования корово-литосферной системы и ассоциированная с ними магматическая деятельность.

В пределах западной части Российской Арктики и Северного Ледовитого океана в фанерозое выделяется три возрастных интервала рудогенерирующих процессов, которые закономерно распределены в пространстве и отражают специфику развития континентальной коры и океанических бассейнов. К наиболее ранним из них можно отнести те, которые связаны с закрытием океана Япетус в раннем ордовике—позднем девоне (505–362 млн. лет назад) и формированием складчатой системы каледонид на окраине Балтийского щита, арх. Шпицберген и в северной части Гренландии. Позже произошло закрытие Палеоуральского океана в раннепермское — раннетриасовое время (290–241 млн. лет назад) и была сформирована складчатая система Урала по линии: Полярный

Урал — о. Пай-Хой — арх. Новая Земля — п-ов Таймыр. Завершающий этап структурных преобразований и рудогенеза связан с процессами раскола континентальной литосферы и раскрытием океанического бассейна Северного Ледовитого океана в кайнозое (55–0 млн. лет назад) и проявлением гидротермальной активности в срединно-океаническом хребте Гаккеля.

В результате завершения каледонского и герцинского этапов тектогенеза был сформирован единый суперконтинент Пангея, в северной части которого оказались коллизионно совмещенными литосферные плиты Северо-Американского, Восточно-Европейского и Сибирского древних кратонов. Между ними оказались зажатые плиты с гренвилемским фундаментом, к которым можно отнести Западно-Сибирскую и Баренцевоморско-Печорскую платформы (рис. 1). По видимому, в это же время была в основном сформирована и крупная Евразийская океаническая впадина, основную часть которой занимает Канадская или Амеразийская котловина.

Столь сложно сконфигурированное коллизионное сочленение разновозрастных литосферных плит, наряду с образованием складчатых систем, формировало в их теле систему закономерно расположенных в пространстве разрывных нарушений и специфической складчатости перекрывающих их чехольных комплексов. Сложная конфигурация коллизионного сочленения структур Гренландской, Южно-Карской, Восточно-Евро-



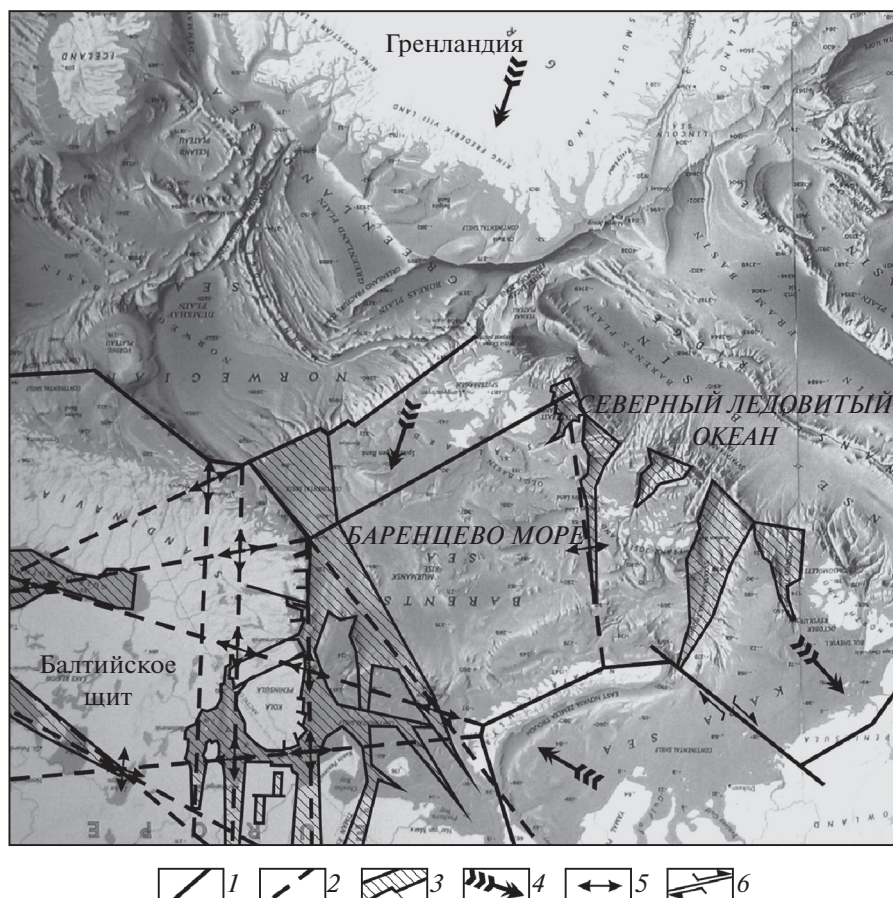
**Рис. 1.** Палеогеодинамическая реконструкция северной части Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ и прилегающего арктического бассейна в палеозое и раннем мезозое (650–241 млн. лет назад). 1 – континентальные терригенные осадки венда (650–570 млн. лет назад), 2 – средне-позднерифейские и вендские осадочные комплексы шельфа и континентального склона пассивной окраины северо-восточной части Балтийского щита и Русской плиты, 3 – складчатые образования североатлантических каледонид в раннем ордовике–позднем девоне (505–362 млн. лет назад), 4 – складчатые образования полярного Урала, Новой Земли и п-ова Таймыр в ранней перми–раннем триасе (290–241 млн. лет назад), 5 – пассивная окраина континента, 6 – генерализованное направление перемещения литосферных плит, 7 – векторы полей напряжения в континентальной литосфере, 8 – трансформный разлом, 9 – контур современной береговой линии.

пейской и Баренцевоморской плит привело к формированию ортогональной Норвежско-Мезенской системы рифтов, разломов и сдвигов, которые наложились на уже существовавшие к тому времени авлакогены гренвильского этапа тектогенеза (рис. 2). Узлы пересечения наиболее крупных линейментов и зон разломов, оси и плечи рифтовых структур зачастую маркируются магматическими комплексами и характеризуются условиями интенсивного прогибания фундамента.

Благодаря этому, в пределах Балтийского щита и севера Русской плиты широко проявился щелочно-ультраосновной, мелилититовый и кимберлитовый магматизм этого времени, с которым тесно связаны месторождения апатит-нефелино-

вых ( $P_2O_5 + (Na,K)AlSiO_4$ ) и апатит-магнетитовых ( $P_2O_5 + FeO \cdot Fe_2O_3$ ) руд, редких земель (тантал, ниобий, церий, неодим, европий, лантан и др.), бадделейта ( $ZrO_2$ ), алмазов и ряда других эндогенных полезных ископаемых. В частности, в центральной части Кольского полуострова развит уникальный магматический комплекс нефелиновых сиенитов и щелочно-ультраосновных интрузий центрального типа (Хибинские и Ловозерские тундры).

Выделяется два возрастных интервала проявления палеозойского магматизма. Ранние интрузивные тела, трубки взрыва и дайки внедрялись в интервале 480–400 млн. лет назад и образуют вытянутую в северо-западном направлении зону,



**Рис. 2.** Реконструкция разрывных нарушений в Восточно-Европейской, Западно-Сибирской и Сибирской платформах в фанерозое (650–241 млн. лет назад). 1 – граница литосферных плит, вдоль которых происходило закрытие палеоокеанов и коллизия, 2 – основные линияменты, формирующиеся в континентальной литосферной плите, 3 – рифты, 4 – генерализованное направление перемещения литосферных плит, 5 – векторы полей напряжения в континентальной литосфере, 6 – трансформный разлом.

протягивающуюся вдоль побережья Кандалакшского залива и далее, включая Ковдорский массив [2]. Более поздние проявления магматизма имеют возраст 400–320 млн. лет и приурочены к разрывным нарушениям северо-восточного и северного простирания [2, 3] (рис. 3). Выявленная закономерность подтверждает сделанные нами ранее выводы о полистадийном проявлении структурообразующих процессов в регионе и связанным с ними магматизмом [4, 6, 7].

На северном побережье Кандалакшского залива Белого моря развиты обширные дайковые поля долеритов субмеридионального и северо-восточного простирания, соответствующие по составу океаническим базальтам. На обоих его побережьях также отмечены дайки лампрофиров северо-восточного простирания, трубки взрыва пикритов, мелилититов и слабоалмазоносных кимберлитов (рис. 3). В районе Онежского озера выявлено поле развития алмазоносных кимберлитовых трубок взрыва, а в Костомукшском рай-

оне – диатремы лампроитов. В Архангельской области, в зоне развития Норвежско-Мезенской системы рифтов, выявлено крупное Зимнебережное поле мелилититов и кимберлитов. Большинство из перечисленных магматических комплексов каледоно-герцинского возраста приурочены к узлам пересечения крупных разрывных нарушений и маркируют разрыв сплошности литосферы.

Для Баренцево-Карского шельфа в фанерозое характерно проявление нескольких этапов дайкового (силлового) магматизма основного состава. Первый из них относится к поздне- или пострифейскому этапу и развит в пределах Баренцево-морского побережья Балтийского щита и в Новоземельской складчатой зоне. Следующий – силурийский этап был проявлен в интервале 434–400 млн. лет назад. Еще позже развивался позднедевонский-раннекарбонный магматизм (360–330 млн. лет назад), а затем позднепермско-раннетриасовый (257–228 млн. лет назад) и позднейурско-раннемеловой (159–131 млн. лет назад).



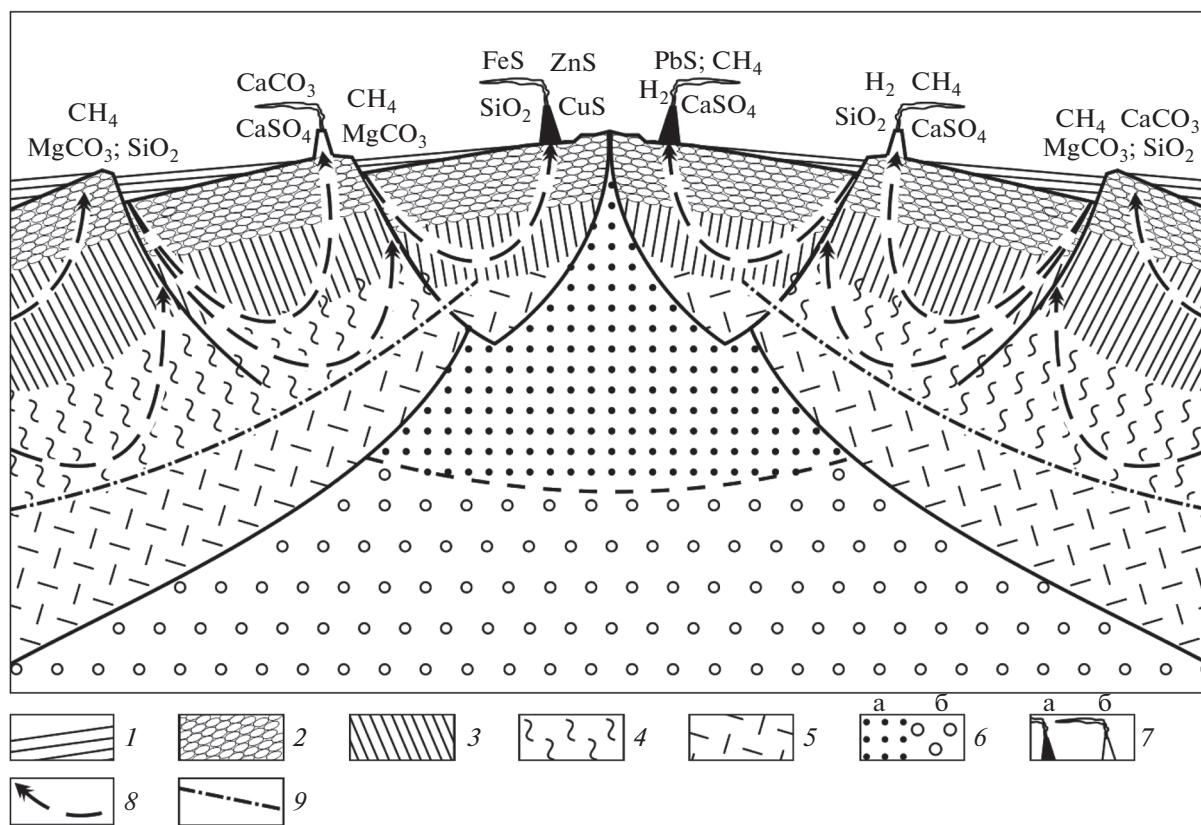
**Рис. 3.** Схема проявления тектоники и распределения основных интрузивных массивов и трубок взрыва палеозойского возраста в северо-восточной части Балтийского щита. 1 – линейные зоны концентрации глубинных тектонических разломов палеозойского возраста, 2 – интрузии щелочно-ультраосновного состава, 3 – мелилититовые трубки взрыва, 4 – кимберлитовые трубки взрыва, 5 – лампроитовые трубки взрыва.

Завершение активной магматической деятельности в регионе связано с раскрытием Северного Ледовитого океана в эоцене. На арх. Земля Франца-Иосифа и Шпицберген развит полистадийно проявленный (60–25 и ~1 млн. лет назад) комплекс субпараллельных даек северо-западного простирания и покровных вулканитов основного состава, а также силлов долеритов и долерито-базальтов, которые внедрялись в верхнетриасовые отложения.

Северный Ледовитый океан является продолжением Атлантического и в его срединно-океаническом хребте проявлены закономерные процессы вулканизма, дифференциации мантийного вещества и гидратации коры, приводящие к активной гидротермальной деятельности. В преде-

лах хребта Гаккеля и на его склонах (рис. 1, 4) широко развиты гидротермальные процессы, через которые в океаническую кору и гидросферу выносятся большое количество эндогенного вещества, в том числе халькофильных рудных элементов и кремнезема. В них формируются сульфидные проявления цинка, меди, свинца и других металлов [5, 8]. Там же происходит гидратация приповерхностных слоев мантии и протекает ряд химических реакций, важных для поддержания на Земле устойчивых экологических условий, а также для формирования карбонатных и кремнеземистых фаций.

Так, в процессе гидратации пород океанической коры оливин ( $Mg_2SiO_4$ ) переходит в серпентин ( $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ ) и магнезит ( $2MgCO_3$ ), а



**Рис. 4.** Разрез океанической литосферы и геохимия гидротермальных процессов в рифтовой зоне срединно-океанического хребта: 1 – осадки; 2 – базальты (подушечные лавы); 3 – долеритовые дайки (комплекс дайка в дайке); 4 – серпентинитовый слой; 5 – подкорový слой литосферы; 6 – мантия: а – магматический очаг под гребнем срединно-океанического хребта, б – астеносфера; 7 – постройки черных (а) и белых (б) “курильщики”; 8 – направление движения океанических вод в толще океанической коры; 9 – критический уровень устойчивости воды.

анортит ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) – в каолин ( $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ ) и карбонат ( $\text{CaCO}_3$ ). Данные реакции протекают с выделением  $\text{CO}_2$ . Благодаря этим реакциям, в атмосфере Земли, с одной стороны, поддерживается равновесное и сравнительно низкое парциальное давление углекислого газа, а, с другой стороны, в океан постоянно поставляется исходный материал для нормальной жизнедеятельности скелетных организмов (в том числе моллюсков фораминифер и кокколитофорид), участвующих в формировании карбонатных пород.

При гидратации пироксенов из рифтовой зоны обильно выносятся кремнезем благодаря переходу энстатита ( $\text{MgSiO}_3$ ) в серпентин ( $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ ). Этот процесс идет с выделением энергии и способствует формированию организмов с кремневыми скелетами, а также отложению кремнистых осадков. При окислении двухвалентного силикатного железа до трехвалентного состояния в присутствии углекислого газа образуется abiогенный метан. При этом, фаялит ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) и форстерит ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ), взаимодействуя с водой и углекислым газом, переходят в серпентин, гематит

( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и метан ( $\text{CH}_4$ ). При окислении  $\text{Fe}^{2+}$  без  $\text{CO}_2$  вместо метана образуется водород.

В океанических рифтовых зонах происходит вынос из мантии в океаны многих рудных элементов, в том числе железа, цинка, свинца, меди, марганца и других рассеянных элементов. Выносятся из мантии и сера, образующая сульфиды этих рудных элементов, хотя заметная ее часть попадает в сульфиды благодаря восстановлению сульфатной серы ( $\text{MgSO}_4$ ) океанических вод до магнезита ( $\text{MgCO}_3$ ) при взаимодействии с метаном и водородом из этих же зон.

Освобождающийся сероводород является исключительно “агрессивным” минерализатором, поэтому он образует соединения железа и других рудных металлов (медь, цинк, свинец) с серой, образуя сульфиды в базальтах и ультраосновных породах океанической коры. Следует отметить, что все протекающие в рифтовой зоне химические реакции необратимы и сопровождаются выделением энергии.

Попадающие в воду соединения металлов переходят в осадки, формируя вокруг горячих гид-

ротермальных источников (“черных курильщи-ков”) рифтовых зон залежи сульфидов рудных элементов, а на океанической коре — слой металлоносных осадков [1]. Сульфидные залежи с течением времени окисляются и разлагаются, а их рудное вещество также переходит в металлоносные осадки.

Помимо гидротермального обогащения океанической коры рудными элементами, в ее низах, на контакте габброидов с дунитами и перидотитами, обычно возникают залежи магматогенных и хромитовых полосчатых руд. Их происхождение связано с прямой дифференциацией мантийного вещества непосредственно в магматическом очаге под рифтовыми зонами. Иногда эти руды представляют собой “отстой” плотной фазы — хромитовых кумулатов базальтовых расплавов, опустившиеся на дно магматического очага, подстилаемого реститовыми мантийными породами.

Полистадийный магматизм описываемого региона связан в основном с процессами раскола континентальной литосферы и формированием океанических бассейнов, а также с коллизией литосферных плит и поглощением (субдукцией) океанической коры. За исключением последнего, современного этапа, связанного с формированием Атлантического океана, все проявления магматизма фиксируются нами на плечах шовных структур, которые маркируют границы плит и отражают внутреннюю организацию разломной тектоники. Изучение пространственно-временных закономерностей проявления магматизма в западной части Российской Арктики показало, что основные месторождения эндогенных полезных ископаемых приурочены к структурно-вещественным ансамблям фанерозоя и концентрируются в узлах пересечения наиболее крупных зон разрывных нарушений. Гидротермальная активность связана преимущественно с процессами раскрытия Северного Ледовитого океана в эоце-

не и ассоциирует со срединно-океаническим хребтом Гаккеля. Состав магматитов чаще всего соответствует базальтам нормальной щелочности. Исключение составляют позднепермско-раннетриасовый и позднеюрско-раннемеловой периоды, которые, по нашему мнению, фиксируют процессы завершения активной стадии герцинской фазы складчатости и снятия тектонической нагрузки в постколлизийный этап развития Баренцево-Карского региона.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ (грант № 14-50-00095).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богданов Ю.А., Лисицин А.П., Сагалевич А.М., Гурвич Е.Г.* Гидротермальный рудогенез океанского дна. М.: Наука, 2006. 527 с.
2. *Ветрин В.Р., Калинин М.М.* Реконструкция процессов внутрикорового и корово-мантийного магматизма и метасоматоза (по результатам изучения глубинных включений). Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1992. 108 с.
3. *Дудкин О.Б., Минаков Ф.В. и др.* Карбонатиты Хибин. Апатиты: Изд. КФ АН СССР, 1984. 96 с.
4. *Козлов Н.Е., Сорохтин Н.О., Глазнев, В.Н. и др.* Геология архея Балтийского щита. СПб: Наука, 2006. 345 с.
5. *Лисицын А.П., Богданов Ю.А., Гурвич Е.Г.* Гидротермальные образования рифтовых зон океана. М.: Наука, 1990. 256 с.
6. *Сорохтин О.Г., Митрофанов Ф.П., Сорохтин Н.О.* Происхождение алмазов и перспективы алмазности восточной части Балтийского щита. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1996, 146 с.
7. *Сорохтин О.Г., Митрофанов Ф.П., Сорохтин Н.О.* Глобальная эволюция Земли и происхождение алмазов. М.: Наука, 2004. 260 с.
8. *Сорохтин О.Г., Сорохтин Н.О.* Тепловые режимы формирования континентальных плит в раннем докембрии // Жизнь Земли / Строение и эволюция литосферы. М.: МГУ, 1995. С. 43–60.

## Evolution of Magmatic and Hydrothermal Activity in the Western Arctic and North Atlantic

**N. O. Sorokhtin, L. I. Lobkovsky, G. V. Novikov, N. E. Kozlov, O. Yu. Bogdanova, S. L. Nikiforov**

This article discusses the geodynamic evolution of the lithosphere in the Arctic region during the Phanerozoic and its polyphasic structural and real organization. Presents spatial and temporal patterns of the mosaic of uneven joints of lithospheric continental plates in Caledon Hercynian stage of development and the formation of oceanic basin of the North Atlantic and the Arctic Ocean in the Cenozoic. It describes the conditions for the formation of various systems of faults kinematic nodes intersections expressed specific magmatism, which determines the formation of a number of mineral deposits. It is shown that hydrothermal activity in the region is mainly associated with the processes of disclosure of the ocean in the Eocene and is confined to the mid-ocean ridges.