

## Научные статьи

УДК 552.32

DOI: 10.31431/1816-5524-2018-3-39-9-25

### КОНТАМИНАЦИЯ МАГМЫ, ОСОБЕННОСТИ ПЕТРОГЕНЕЗИСА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РУДНОГО ВЕЩЕСТВА В ПОРОДАХ НИКЕЛЕНОСНОЙ ФОРМАЦИИ СРЕДИННО-КАМЧАТСКОГО МАССИВА (часть вторая)

© 2018 О.Б. Селянгин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН Петропавловск-Камчатский, 683006,  
e-mail: selyang@kscnet.ru

<sup>2</sup>Научно-исследовательский Геотехнологический центр ДВО РАН Петропавловск-Камчатский, 683002

В статье обсуждаются вещества-контаминанты никеленосной магмы разного состава и фазового состояния. Описывается распределение различных твердофазовых контаминантов (ксенолитов) в интрузивах и в разных по составу кумулатных породах. Ксеногенный материал представлен как породами, вмещающими интрузивы, так и более глубинными, не выходящими на поверхность. Для оценки воздействия контаминации магмы на разнообразие серий кумулатов и локализацию в них сульфидных руд в качестве эталона сравнения приводятся соответствующие данные по одному из рудоносных интрузивов, сформированному практически неконтаминированной высокомагнезиальной («исходной») магмой. Освещаются контаминация магмы высокоглиноземистыми углистыми сланцами, разнообразие образующихся серий ее кумулатов и экзотичные флотационные графит-сульфидные руды в глиноземистых гранодиоритах одного из интрузивных тел.

*Ключевые слова:* никеленосная магма, контаминация, серии кумулатов, рудоотложение, флотация сульфидов.

#### ВВЕДЕНИЕ

Экстраординарное сочетание состава высокомагнезиальной водной рудоносной магмы Камчатской никеленосной провинции (КНП) и локализации ее внедрений в прогретых сиалических породах Срединно-Камчатского массива (СКМ) на позднеметаморфической стадии его развития (Селянгин, 2018а) создали условия глубокого и разнообразного их взаимодействия, отразившегося в составах серий образовавшихся пород и процессах рудоотложения.

#### ВЛИЯНИЕ КОНТАМИНАЦИИ МАГМЫ НА РАЗНООБРАЗИЕ ЕЕ КУМУЛАТОВ И ЛОКАЛИЗАЦИЮ РУД В ПОРОДАХ РАЗНОГО СОСТАВА

Состав исходной магмы КНП модифицировался ее контаминацией веществом интрузируе-

мых пород, а также смешением с продвинутыми дифференциатами предыдущих пополнений (автоконтamination). Это меняло состав и последовательность выделения магмой ликвидусных фаз и пути дифференциации соответствующих ее порций, пополнявших интрузивы. Соответственно различными оказывались серии производных от них кумулатных пород, в том числе и рудовмещающих.

В КНП, однако, контаминации чужеродным веществом подвергалась не только магма, но и существенная часть формировавшихся ею кумулатов на стадии их неполного отвердевания — вследствие захоронения в них реликтов ксенолитов и привноса в качестве своеобразного контаминанта водно-щелочного флюида, вызывавшего их поздне-(мета)-магматические преобразования. Таким образом, в широком смысле можно говорить о влиянии на магматиты КНП контаминантов разных фазовых состояний:

твердого, жидкого и флюидного, и о двух этапах их воздействия — ранне- и позднемагматическом.

Высокая исходная водонасыщенность магмы КНП с растворенной в ней рудой обусловила, с одной стороны, снижение плотности, способствовавшее ее подъему и внедрению в сиалические метаморфиты СКМ, а с другой — ее относительно низкотемпературный характер. Тем не менее, внедрение магмы в еще горячие породы на позднесинметаморфической стадии развития СКМ, а также ее состав, относительно недосыщенный веществом потенциальных контаминантов, обеспечили ей достаточно высокую ассимиляционную способность — при большом разнообразии вариантов реализации этого потенциала для разных вмещающих пород.

Большая длительность остывания интрузивов (пропорциональная их размерам) в прогретых вмещающих толщах обусловила соответственно сниженные скорости кристаллизации и длительность дифференциации силикатной части магмы, — в контрасте с высокой скоростью осаждения в ней рудной фазы. В таких условиях ликвидировавшая руда осаждалась как одна из ранних кумулюсных фаз — вместе с первыми силикатными минералами кумулатов, и не могла оставаться в их более эволюционировавших, позднее образованных разностях, а тем более в конечных гранитоидных дифференциатах. Тем не менее, такие ассоциации руда–порода существуют.

Из этой дилеммы возможны разные выводы: 1) в магме во время и сразу после ее внедрений происходили процессы, увеличивавшие скорость изменения состава ее силикатной фракции и образуемых ею кумулатов до значений, соизмеримых со скоростью сегрегации руды; очевидно, такими процессами могли быть именно контаминация магмы веществом прогретых интродуцируемых пород, а также смешение в интрузивах магм разных стадий дифференциации; 2) уже сформированные в качестве рудовмещающих, но еще неполностью отвердевшие рыхлые кумулаты с разными долями интеркумулюсного силикатного и рудного расплавов претерпевали изменения состава и структур на позднемагматической стадии их становления, т.е. в присутствии уже содержавшегося в них рудного вещества, или осаждавшегося через них из магм следующих пополнений интрузивов. Новообразуемые породы оказывались как бы заново «подложенными под руду». В интрузивах КНП имели место оба типа процессов, и указанные первыми в определенной степени могли способствовать реализации вторых; 3) имели место процессы механического совмещения рудного расплава и генетически уже чуждых ему дифференциатов контаминированной магмы и их гибридных производных.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КОНТАМИНАЦИИ МАГМЫ ТВЕРДОФАЗОВЫМ ВЕЩЕСТВОМ: БРЕКЧИРОВАНИЕ ИНТРУДИРУЕМЫХ ПОРОД, ПРОЦЕССЫ ИХ УСВОЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КСЕНОЛИТОВ В МАКРОРИТМАХ РАССЛОЕННОСТИ ИНТРУЗИВОВ

Контаминация плутонических магм веществом интродуцированных пород опознается по двум взаимно коррелирующим и сравнительно легко наблюдаемым признакам: присутствию в их породах резорбированных ксенолитов и ксенокристов пород–контаминантов определенного преобладающего состава, и по соответствующему им общему характеру изменения химического и минерального составов образующихся серий кумулатных пород–дифференциатов. Ксенолиты пород, в разной степени усваивавшихся в магматитах КНП, представлены практически только сиалическими, кремнеземистыми и кремнезем–глиноземистыми метаморфитами фундамента СКМ, вмещающих толщ и древних гранитоидов — с разными в их составах пропорциями кремнезема и глинозема. Редко встречающиеся включения мафитов являются автолитами.

Представляя процесс «разбавления» магмы усвояемой (ассимилируемой) частью чужеродного вещества интродуцированных пород, контаминация в ограниченных масштабах может проявляться у контактов ее внедрений. Так, заметное обогащение кремнеземом, глиноземом, известью и оксидом титана показывают измененные породы сохранившихся участков эндоконтактной зоны Восточно–Геофизического интрузива в северной части КНП, внедренного в апограувакковые ильменит–содержащие углистые кристаллосланцы камчатской серии (Селянгин, 2006). Выразительный пример физического и химического взаимодействия умеренно мафической магмы с вмещающими гнейсо–гранитами наблюдался в основании тела расслоенных пироксенитов–лейкогаббродиоритов, метамагматически преобразованных в биотит–амфиболовые разности. Они обнажались в 50 м южнее бывшего выхода интрузива месторождения Шануч. Частично плавленый материал гнейсо–гранитов мелкими (первые см) диапирами и каплями всплывал в зону приподошвенного эндоконтакта мафитов мощностью 3–5 см, сложенную мелкозернистыми гибридными гранодиоритами.

Однако масштабное развитие контаминации магмы всего объема интрузива или его отдельных крупных пополнений предполагает

определенную степень предварительной механической дезинтеграции в магме пород-контраминантов, обеспечивающей быстрый прогрев их массы и большую суммарную площадь контакта взаимодействующих фаз. Дезинтеграция может происходить при брекчировании прорываемых глубинных пород на путях подъема магмы, вносящей усвояемые «на ходу» ксенолиты в образующийся интрузив, или при механической и термической деструкции собственно вмещающих пород последнего; оба варианта могут последовательно проявиться в одном интрузиве. Диспергирование в магме чужеродного материала продолжается также в процессе его усвоения — при термическом растрескивании и импрегнации силикатным или рудным расплавом, при парциальном плавлении ксенолитов с поглощением низкотемпературных выделок и дезинтеграцией тугоплавких остатков. Последние далее подвергались растворению на разных стадиях эволюции магматической системы. В зависимости от состава, плотности и размеров, недоусвоенные магмой реликты ксенолитов могли либо всплывать в магме, либо погружаться на разные уровни в толщи формировавшихся кумулатов, выполняя в них отмеченную роль маркеров характера прошедших общих изменений состава магмы, а также центров иногда продолжавшегося около них локального изменения состава горячих кумулатов.

Контаминация могла осуществляться и в ходе дифференциации магмы, на ее промежуточных стадиях. Так, в одном из макроритмов расслоенности интрузива Кувалорог ранние вебстерит-меланогабброноритовые кумулаты вверх по разрезу сменяются мела- и лейконоритовыми, что могло быть вызвано усвоением магмой глиноземистого материала внезапно обрушившейся в нее кровли интрузива (Селянгин, 2014а).

Однако, как правило, признаки контаминации магмы веществом некоторого преобладающего состава прослеживаются на всем протяжении кумулатных серий разных макроритмов расслоенности, во всех их породах, начиная с самых ранних из наблюдаемых, — и в том числе рудовмещающих, если таковые присутствуют. Это указывает, что в случаях контаминации ювенильной рудоносной магмы она чаще всего начиналась на ранних этапах ее эволюции — одновременно с ее ликвацией и частичной кристаллизацией, на путях внедрения через породы коры и при формировании (или пополнении) ею интрузивных камер.

Распределение ксенолитов в кристаллических, кумулатных продуктах дифференциации отдельных порций контаминированных магм — в макроритмах расслоенности интрузивов — зависело от изменявшегося сочетания ряда

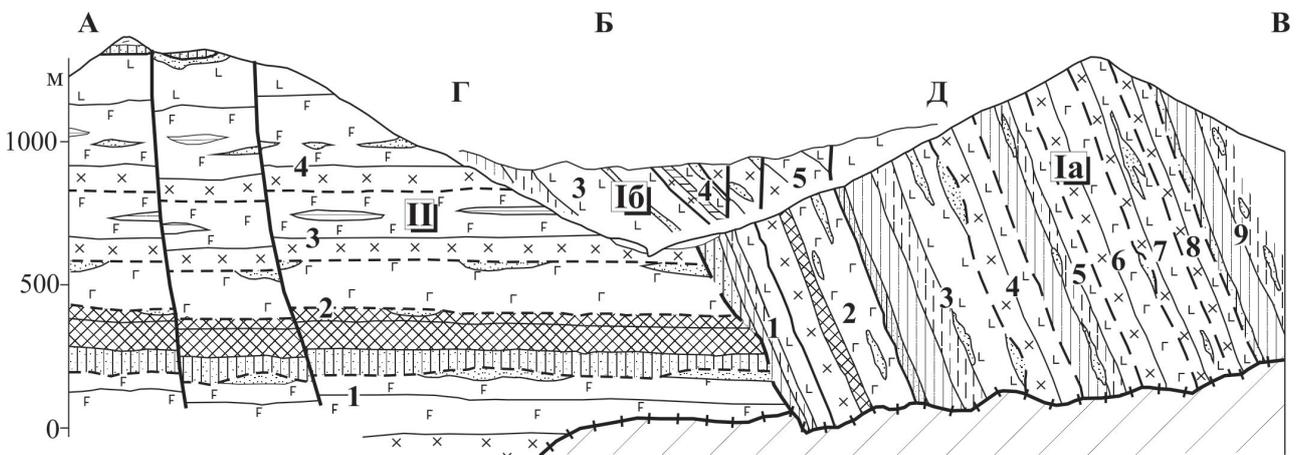
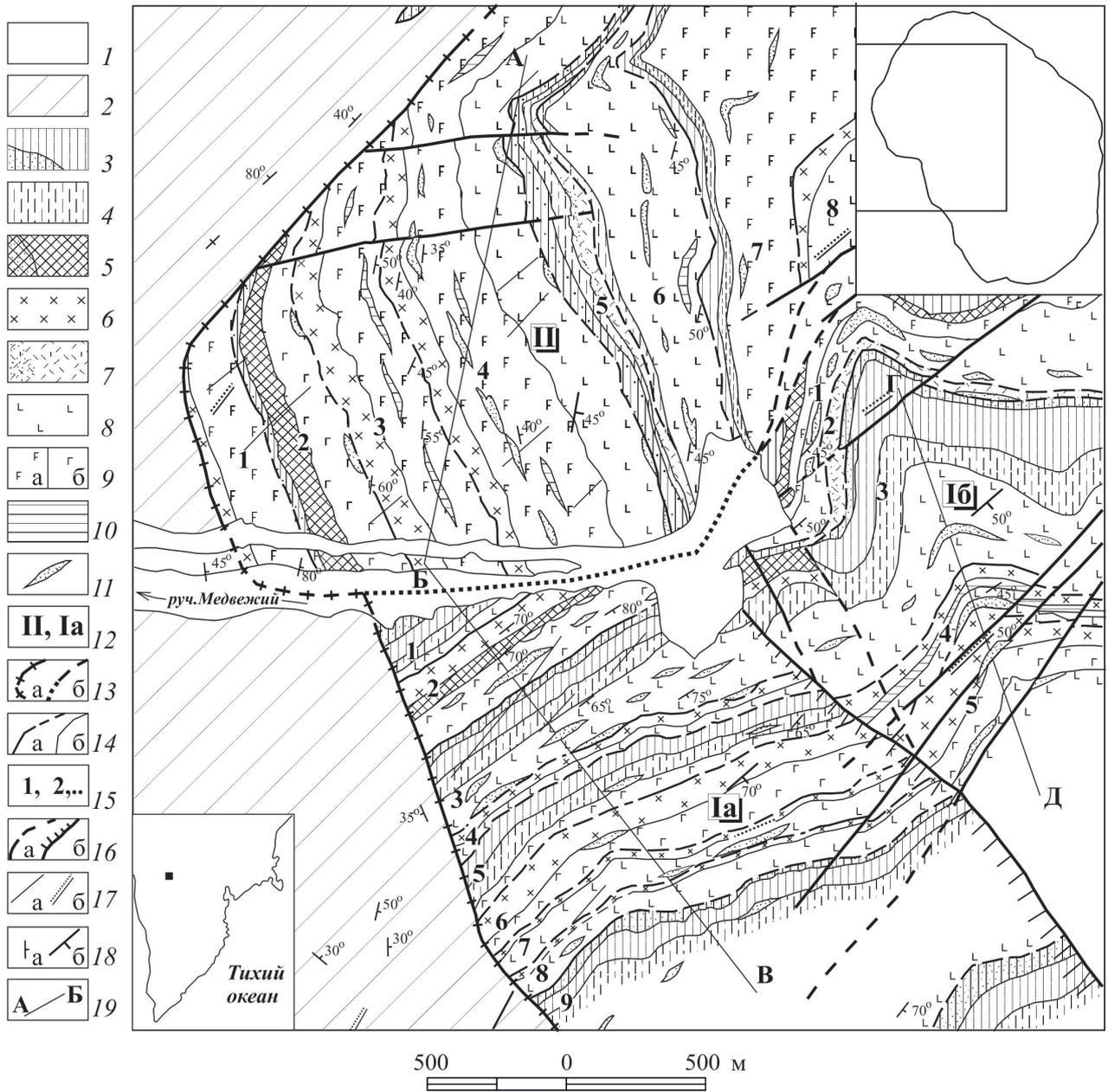
факторов. Соответственно времени попадания в расплав, размерам, составу и плотности ксенолитов, в той или иной мере превышавшей плотность водонасыщенной магнезиальной магмы (или уже только ее в разной степени продвинутых дифференциатов), они (их недоусвоенные магмой реликты) захоранивались на разных уровнях в толщах кумулатов, — одновременно и вслед за формировавшими их более плотными минералами. При общей отрицательной плавучести ксенолитов разница их плотностей с кумулатными минералами компенсировалась более крупными размерами реликтов ксенолитов, обеспечивавшими им гидравлическую эквивалентность (равную скорость осаждения) с тяжелыми, но мелкими вкрапленниками фемических фаз.

В реальности реликты пород-контраминантов могут присутствовать далеко не во всех породах кумулатных серий, но их отсутствие в каких-либо породах макроритмов расслоенности еще не говорит об их ювенильном происхождении: определенные доли ксеногенного материала могли быть усвоены полностью, всплыть в магме или утонуть. И напротив, присутствие даже в самых поздних кумулатах недоусвоенных магмой реликтов пород-контраминантов может служить признаком прошедшего с их участием изменения ее состава с самой ранней стадии, в продуктах которой они не наблюдаются.

В изученных интрузивах северной и южной зон КНП проявилась тенденция предпочтительной приуроченности ксенолитов определенных составов к разным интрузивам и кумулатным породам разного состава. Существенно кремнеземистые, кварцитовые ксенолиты, единичные в южном интрузиве Кувалорог, в изобилии присутствуют в некоторых малых телах Шанучского рудного поля северной зоны КНП — в интрузивах (фрагментах интрузивов) месторождения Шануч и близких к нему тел (Селянгин, 2014а).

В изученной трети массива Кувалорог практически во всех его макроритмах, сформированных порциями контаминированной магмы, абсолютно преобладают ксенолиты вмещающих глиноземистых углерод-содержащих метаосадочных пород: биотит-гранатовые, шпинелевые, нередко со ставролитом и силлиманитом контактовые метаморфиты по пелитовым сланцам, двуслюдяные гранатовые кварц-полевошпатовые метапесчаники и метаалевролиты хейванской свиты. Размеры ксенолитов варьируют от мелких обломков до гигантских, в первые десятки метров мощностью и до сотен метров протяженностью, линзо- и пластообразных блоков-отслоений кровли интрузива (рис. 1). Подавляющая часть крупных блоков, тем не менее, сосредоточена именно в верхах макроритмов расслоенности интрузива, среди насыщенных плагиоклазом

СЕЛЯНГИН



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта северо-западной части интрузива Кувалорог (Селянгин, 2007, с изменениями): 1 — рыхлые четвертичные отложения; 2 — метатерригенные отложения хейванской свиты (верхний мел); 3 — амфиболовые ортопироксениты (с точечным крапом — оливиновые и оливин-содержащие); 4 — меланориты; 5 — амфиболовые вебстериты (с крапом — оливин-содержащие) и ортопироксеновые горнблендиты; 6 — меланогаббронориты; 7 — слюдяные горнблендиты (крап — оливин-содержащие разновидности); 8 — нориты; 9 — амфиболовые и ортопироксен-амфиболовые габбро и габбронориты (а), и дупироксеновые габбронориты (б); 10 — горнблендиты; 11 — крупные ксенолиты-отслоения вмещающих пород хейванской свиты, контактово-метаморфизованные; 12 — фазы внедрения интрузива (цифры) и блоки его пород (буквы) с разным наклоном расслоенности; 13 — сорванные катаклазированные контакты интрузива с вмещающими породами (а) и граница предполагаемых фаз внедрения интрузива, погребенная (точки) и предполагаемая (пунктир) (б); 14 — границы маккоритмов расслоенности интрузива (а) и границы между слоями в маккоритмах (б); 15 — нумерация маккоритмов расслоенности по порядку напластования в каждой(-м) из фаз и блоков; 16 — разломы, установленные и предполагаемые (пунктир) (а), предполагаемое положение шарнирного сброса, разделяющего блоки интрузива 1а и 1б (б); 17 — дайки амфибол-плагиофировых андезитов (неоген) (а) и кварцевые жилы (б); 18 — элементы залегания вмещающих пород и расслоенности пород интрузива: а — замеренные, б — принятые в качестве средних для выделенных фаз и блоков; 19 — линии разрезов. На врезках: положение района исследований (внизу), общий контур интрузива и изученная часть его выхода (вверху).

**Fig. 1.** Schematic geological map of the northwest part of the Kuvalorog intrusion (Selyangin, 2007, as modified): 1 — loose Quaternary deposits; 2 — meta-terrigeneous deposits of the Heyvan set (Upper Cretaceous); 3 — amphibole orthopyroxenites (with olivine and olivine-containing spots); 4 — melanorites; 5 — amphibole websterites (with olivine-containing spots) and orthopyroxene hornblendite; 6 — melanogabbronorites; 7 — micaceous hornblendites (spots with olivine-containing varieties); 8 — norites; 9 — amphibole and orthopyroxene-amphibole gabbros and gabbronorites (a), and bipyroxene gabbronorites (b); 10 — hornblendites; 11 — large xenoliths cleaved of the host rocks of the Heyvan set, contact-metamorphosed; 12 — phases of intrusions (figures) and blocks of its rocks (letters) with different inclination of lamination; 13 — broken cataclastic contacts between the intrusion and host rocks (a) and the boundary of the supposed phases of intrusion, buried (dots) and supposed (dotted line) (b); 14 — the boundaries of the macro-rhythms of the stratification of the intrusion (a) and the boundary between layers in macro-rhythms (b); 15 — numbering of bedrock macro-rhythms by the order of bedding in each of phases and blocks; 16 — faults revealed and assumed (dotted line) (a), the supposed position of the hinged fault separating the blocks of the intrusion 1a and 1b (b); 17 — dikes of amphibole-plagiophyric andesites (neogene) (a) and quartz veins (b); 18 — elements of enclosing rocks bedding and stratification of intrusive rocks: a — measured, b — accepted as averages for selected phases and blocks; 19 — lines of cuts. Inset: the position of the studied area (bottom), the general contour of the intrusion and the studied part of its outcrop (top).

лейкогабброидов и на поверхностях их слоев, образуя здесь основания (подшвы) для нижних ультрамафитовых слоев следующих маккоритмов. Внутри этих ультрамафитов встречаются лишь редкие обломки подобных ксеногенных пород, богатых контактово-метаморфическими гранатом и глиноземистой шпинелью — в локальных ореолах лейко- и меланоритового состава.

Такая «верхняя» локализация крупноразмерных блоков-ксенолитов метаосадочных пород, сходных по плотности с погружавшимися, парциально плавившимися и растворявшимися мелкими, отражает, вероятно, одновременность их попадания в магму. Крупные отслоения и обрушения кровли интрузива происходили, очевидно, на поздней стадии эволюции магмы каждой порции — за счет ее усадки в процессе охлаждения и кристаллизации. В результате контактового метаморфизма этих отторженцев и «обновлявшейся» обрушениями кровли интрузива плотность пород последней к концу формирования магмой лейкогабброидных кумулатов оказывалась большей, чем у внедрявшейся над ними магнезиальной магмы следующего пополнения интрузива, предотвращая их всплывание в ней.

Зависимость распределения ксенолитов пород разных составов в толщах кумулатов от соотношений их физических свойств в основном совпадает и с соотношением свойств химических, несмотря на различия размеров обломков. Реликты ксенолитов кварцитов (очевидно, более плотных, чем водонасыщенная магма), обычные в интрузивах северной зоны КНП, в основном содержатся в насыщенных кремнеземом мафитах — пироксенитах и меланогабброидах. Ксенолиты глиноземистых сланцев с их более вариативной плотностью, изменявшейся и в ходе их преобразований, широко распространены в большинстве маккоритмов расслоенности интрузива Кувалорог, но при этом редки или отсутствуют в более плотных и неравновесных с ними ультрамафитах и меланогабброидах нижних частей этих маккоритмов, магма которых не была насыщена глиноземом (плагиоклазом). Однако общие различия кумулатных серий таких маккоритмов указывают, что более глиноземистые из них образованы порциями магмы, начинавшей ассимилировать захваченный при внедрении ксеногенный материал уже на ранних стадиях дифференциации. Нерастворившаяся его часть всплывала

в эволюционировавшей далее магме. Многочисленные мелкие (в первые см) ксенолиты сланцев, в том числе частично плавленных (с межзерновым «капельным» гранофиром), присутствующие в верхних, насыщенных плагиоклазом норитовых и амфибол-лейкогабброноритовых слоях макроритмов интрузива, влияли на эти габброиды обогащением их узких приконтактных зон мелкочешуйчатым графитом, гранатом и (или) шпинелью. В конечных двупироксеновых лейкогабброноритовых кумулатах исходной магмы КНП ксенолиты глиноземистых сланцев редки и бывают последовательно окружены узкими зонами норитов и амфиболовых габброноритов, образуя, таким образом, общую структуру мозаичного неравновесия кумулатного слоя. При более ранней контаминации глиноземом магмы с уже выделившимся в ней клинопироксеном он подвергся коррозии гастингситовым амфиболом.

Однако, несмотря на намеченную «специализацию» интрузивов КНП по составу пород-ксенолитов, даже в близко расположенных телах, внедренных в одни и те же породы, могла происходить (или не происходить совсем) контаминация их магм веществом разного состава. Это наглядно проявилось в телах западной части Шанучского рудного поля, в северной рудной зоне КНП (Селянгин, 2018а). Здесь они большей частью внедрены в позднемеловые гнейсограниты, в зоне согласного нижнего контакта их массива с вмещающими кристаллосланцами камчатской серии. Поглощение гранитоидных ксенолитов, ассимилируемых легче других вследствие их эвтектоидного состава, достаточно заметно по их реликтам только в одном из изученных фрагментов интрузивов — «рудного тела 4». В других телах наблюдаются следы ассимиляции гораздо более тугоплавких пород: помимо отмеченных кварцитов, их представляют глиноземистые кристаллосланцы (в интрузивах «рудного тела 2», «скважины 140ж» (Селянгин, 2014а), в интрузиве Графитовом далее к востоку). В то же время в Восточно-Геофизическом интрузиве, внедренном в апограувакковые кристаллосланцы у восточного края Шанучского рудного поля, ксенолиты единичны, контаминация, как отмечалось, проявилась лишь в его приконтактных зонах, а магма основного объема первой порции его заполнения сохраняла состав, наиболее близкий к исходному.

Подобным же образом в южной зоне, у северо-западного края интрузивного массива Кувалорог, богатого лишь ксенолитами глиноземистых сланцев, обнажается часть небольшого интрузива рудопроявления Аннабергитовая Щель, с выходом слоя (1.5–2.0)×18 м рудоносных гранофировых автобрекчий измененных

мафитов с реликтами ксенолитов кварцитов, подобных отмеченным для тел Шанучского поля.

Очевидно, внедрения магмы по разломам или трещинам гидроразрыва могли иметь более или менее брекчирующий характер, а ксеногенный материал даже близко расположенных интрузивов или отдельных ритмов их расслоенности мог захватываться магмой из разноглубинных горизонтов метаосадочных толщ, начиная усваиваться на путях ее подъема в формирующиеся интрузивные камеры.

### ПРОДУКТЫ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ МАГМ КНП С РАЗНЫМ ХАРАКТЕРОМ И СТЕПЕНЬЮ КОНТАМИНИРОВАННОСТИ

В зависимости от соотношений кремнезема и глиноземистых фаз в породах-контаминантах, в составе общей сложно-дифференцированной серии пород КНП можно выделить три основных вида частных серий магматитов-кумулятов, образующихся: 1) при некотором субэвтектическом соотношении указанных компонентов в усваивавшемся веществе, оптимальном для его плавления; это качество свойственно также продвинутому жидким дифференциатам магмы — ингредиентам возможного смешения с ними новых порций исходной магмы (автоконтаминации); 2) при избытке глинозема 3) при избытке кремнезема.

Контаминация магмы сиалическим веществом с субэвтектическими пропорциями компонентов, по составу близким ее конечным дифференциатам, снижает доли ненасыщенных ими ранних минералов (оливина, клинопироксена) и увеличивает количество ее конечных кислых производных (Боуэн, 1931; Мак-Берни, 1983), но редко оставляет визуально читаемые следы в кумулатных продуктах ранних стадий ее эволюции. Сходный эффект дает и смешение магмы с ее собственными, в разной степени продвинутыми дифференциатами. Среди производных водной и высокомагнезиальной магмы КНП возникали, однако, и неординарные продукты смешения их контрастных по составам разностей — ультрамафитовые кумулаты состава слюдяных амфиболитов.

При усвоении магмой твердофазового материала ярко выраженный эффект процесса, непосредственно наблюдаемый в разных кристаллических дифференциатах магмы, показывает ее контаминация сиалическим веществом с избытком противэвтектических соотношений либо кварца, либо глиноземистых фаз. Породы, целиком слагаемые минералами глинозема, экзотичны,

в то время как почти чисто кремнеземистые достаточно распространены в виде кварцитов.

При отклонениях составов ксенолитов от мономинеральных их усвоение мафической магмой предвзается выплавлением определенной доли более низкотемпературной, легче поглощаемой субэвтектической жидкости, после чего избыточные над ее составом тугоплавкие фазы либо изолируются каймами реакционных минералов, либо далее усваиваются путем прямого растворения — до насыщения магмы их веществом. Высокомагнезиальный и сравнительно малоизвестковистый состав исходной магмы КНП оставлял возможность усвоения ею силикатных минералов на всем пути ее эволюции — в отличие от распространенных толеитовых или щелочно-базальтовых магм, в которых слагаемые ими ксенолиты и ксенокристы изолируются оторочками из клинопироксена, плагиоклаза и шпинелида (Мак-Берни, 1983).

Представленные полнокристаллическими породами, не имеющими жидких магматических эквивалентов, серии кумулатов резко отличаются по химизму от комплементарных им расплавов, но своим минеральным составом гораздо нагляднее отражают последствия контаминации, трудно уловимые в самих магмах (в сериях вулканитов). В частных сериях кумулатов, нередко содержащих реликты-маркеры ксенолитов интродуцированных и усваивавшихся силикатных пород СКМ, эти последствия проявляются в таких признаках, как уменьшение долей отдельных типов кумулатных пород — до полного выпадения их из серий с заменой на другие, в общем снижении разнообразия пород («укорочении») таких серий, а также в изменении их общего химического и минералого-петрографического характера.

Насыщение магмы растворявшимся тугоплавким веществом ксенолитов знаменовалось началом кристаллизации в ней новых ликвидусных минералов с его участием. Усвоение чистого кремнезема отражалось, в первую очередь, на кристаллизации и реакционном замещении в ряду самых ранних магнезиальных минералов с возрастающим отношением  $\text{SiO}_2/\text{MgO}$  — оливина и ортопироксена. Влияние избыточного глинозема сказывалось на кристаллизации и замещениях (замене) в ряду следовавших за ними кальциевых минералов с возрастающим отношением  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$  — от клинопироксена к Са-амфиболу и плагиоклазу. Пределом этой последовательности была полная замена в конечных лейкоабброидных кумулатах феррических Са-содержащих минералов ассоциацией основного плагиоклаза и ортопироксена (норитовой). После выхода плагиоклаза на котектику в порциях магм, пересыщенных глиноземом,

становилось возможным выделение его избытка в составе граната и шпинели. Эти фазы отсутствуют в дупироксеновых лейкоабброноритах и во всех более меланократовых кумулатах — бесплагиоклазовых или с количеством плагиоклаза, меньшим его доли в котектике с феррическими минералами.

## ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ И РУДООТЛОЖЕНИЕ В ИСХОДНОЙ МАГМЕ КНП

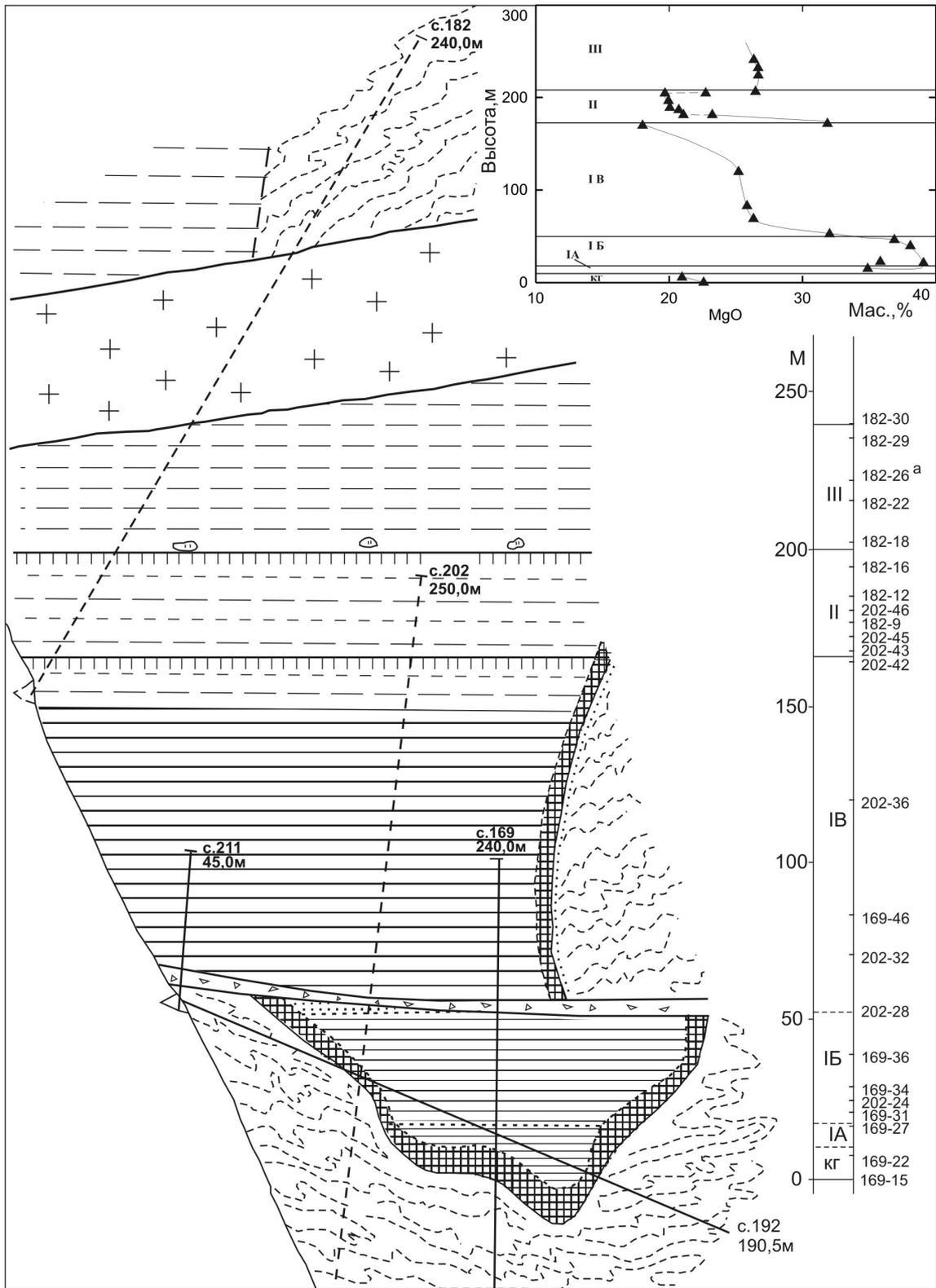
Очевидно, отправным пунктом исследования роли перечисленных приводящих, внешних факторов воздействия на рудно-магматические системы и возникавшие в них парагенезисы руда-порода должен быть анализ эволюции магмы, наиболее близкой к исходной мантийной выплавке (минимально контаминированной, «ювенильной») — в одной порции, без смешения с позднейшими пополнениями, — то есть путем чистой дифференциации.

Состав исходной магмы КНП прямыми методами неопределим. Большинство ее интрузивов формировалось множественными внедрениями отдельных порций магмы, в той или иной мере контаминированной и дифференцированной на до- и внутрикамерной стадиях. В них не обнаружено неизмененных закалочных фаций магматитов у контактов с вмещающими породами, — как отмечалось, по большей части сорванных при их совместных дислокациях.

Состав магмы, ближайший к исходному для КНП, определялся по ряду вещественных признаков *серии* ее самых ранних ультраосновных-ультрамафических кумулатов, содержащей наибольшую долю самых магнезиальных из них — кортландитов. Такая серия проявлена в единственном их изученных нами интрузивов — Восточно-Геофизическом в северной зоне КНП (рис. 2), где слагает незавершенный нижний маккорит его расслоенности.

Штокообразное тело интрузива, внедренного в сравнительно тугоплавкие апограувакковые биотит-кварцевые, с гранатом и ставролитом, графит-содержащие сланцы камчатской серии, было опрокинуто набок (на  $90^\circ$ ) при дислокациях, сопровождавших воздымание ядерной части СКМ. В нижней (теперь юго-юго-западной) своей половине интрузив разведен скважинами ЗАО НПК «Геотехнология». Ими вскрыты кумулатные породы трех ранних маккоритов его расслоенности — фракционатов трех дискретных порций заполнявшей его магмы, из которых каждая последующая, пройдя частичную дифференциацию на глубине, прерывала дифференциацию предыдущей, смешиваясь с ее

СЕЛЯНГИН



- М
- 250
- 182-30
- 182-29
- 182-26<sup>a</sup>
- 182-22
- III
- 200
- 182-18
- 182-16
- 182-12
- 202-46
- 182-9
- 202-45
- 202-43
- 202-42
- 150
- 202-36
- IB
- 100
- 169-46
- 202-32
- 50
- 202-28
- IB
- 169-36
- 169-34
- 202-24
- 169-31
- 169-27
- IA
- 0
- 169-22
- 169-15
- КГ

- 20 0 20 40м
- +
- +
- +
- +
- 1
- |||||
- 2
- 
- 3
- 
- 4
- ====
- 5
- ====
- 6
- ====
- 7
- ====
- 8
- ▭ II ▭ II
- 9
- 
- 10
- а б
- 11
- а / + б / ▽ /
- 12
- с.211 / 45,0? / с.202 / 250,0?
- 13
- 202-43
- 202-42
- 14

**Рис. 2.** Разрез интрузива Восточно-Геофизического (Селянгин, 2006, с изменениями): 1 — риодациты дайки, секущей интрузив; 2 — среднезернистые горнблендиты; 3 — редкопорфировидные пироксеновые горнблендиты; 4 — порфировидные амфиболовые пироксениты; 5 — равномернозернистые амфиболовые пироксениты и их порфировидные оливин-содержащие разности (точечный крап); 6 — безрудные кортландиты; 7 — рудные кортландиты; 8 — породы краевых групп (КГ); 9 — шлиры пегматитов; 10 — вмещающие нижнемеловые (?) кварц-биотитовые, с гранатом и ставролитом кристаллические сланцы камчатской серии; 11 — контакт интрузива и зона ороговикования вмещающих пород (а) и границы макроритмов расслоенной серии (сплошные линии) и слоев разных пород в них (пунктир) (б); 12 — разрывные нарушения — заполненные молодыми интрузиями (риодациты) (а) и зоны брекчирования (б); 13 — номера и отметки глубин разведочных скважин; 14 — положение и номера образцов пород интрузива на шкале его глубины. I – III — макроритмы расслоенности, IA, IB, IB — слои ритма I. На врезке: вариации содержания MgO по разрезу интрузива.

**Fig. 2.** Cross section for the Vostochno-Geofizicheskii intrusion (Selyangin, 2006, as modified): 1 — rhyodacites of the dike that cuts the intrusion; 2 — medium-grained hornblendites; 3 — rareporphyry-like pyroxene hornblendites; 4 — porphyry amphibole pyroxenites; 5 — even-grained amphibole pyroxenites and their porphyry-like olivine-containing differences (dotted spots); 6 — blank cortlandites; 7 — ore cortlandites; 8 — rocks of marginal groups (MG); 9 — shliers of pegmatites; 10 — hosting Lower Cretaceous (?) Quartz-biotite, with garnet and staurolite, crystalline schists of the Kamchatka series; 11 — contact of the intrusion and the zone of hornfelsing of the hosting rocks (a) and the boundaries of the macro-rhythms of the stratified series (solid lines) and layers of different rocks in them (dashed lines) (b); 12 — discontinuous disorders — filled with young intrusions (rhyodacites) (a) and brecciation zones (b); 13 — numbers and depth marks of exploration boreholes; 14 — position and numbers of rock samples from the intrusion on the scale of its depth. I – III — macrorhythms of stratification, IA, IB, IB — layers of rhythm I. Inset: variations in MgO content along the intrusion section.

дериватами, и уже в качестве гибридной магмы эволюционировала до следующего пополнения. Ксеногенный материал в породах интрузива практически отсутствует: лишь в верхах второго макроритма встречены единичные резорбированные ксенолиты кварца, окаймленные его пегматоидными срастаниями с плагиоклазом.

Первый макроритм обладает наибольшей среди изученных интрузивов КНП полнотой набора самых ранних кумулатов и, таким образом, наибольшей информативностью о раннем этапе эволюции рудно-магматической системы. Он включает слои рудовмещающих (Ia, мощность на вскрытом участке 7 м) и практически безрудных (Iб, 31 м) кортландитов, перекрываемых слоем Iв (136 м) оталькованных амфиболовых ортопироксенитов, также безрудных и кверху постепенно переходящих в аповебстеритовые ортопироксеновые горнблендиты и амфиболиты (рис. 2). Макроритмы II и III по составам и характеру смены пород вверх по разрезу подобны слою Iв первого макроритма; в породах III макроритма присутствует тонкая рассеянная вкрапленность интерстициальных сульфидов.

Содержание магнезии в магме, принимаемой за исходную для никеленосной формации, определялось как равновесное наиболее магнезиальному оливину, содержащемуся в кортландитах ( $fo_{84,6}$ ), — с допущением несколько большей магнезиальности его ядер до позднейшего уравновешивания их состава с более железистыми каймами.

Сиалические породы СКМ, вмещающие интрузивы никеленосной формации и присутствующие в них в виде ксенолитов, в подавляющей массе являются кремнезем-глиноземи-

стыми и кальций-дефицитными. Это подтверждает правомерность рассмотрения в качестве ближайшей к исходной для никеленосной формации магмы, подобной образовавшей серию кумулатов первого макроритма расслоенности Восточно-Геофизического интрузива — с содержаниями магнезии и извести, достаточными для образования в ходе ее дифференциации не только существенно магнезиальных оливиновых (рудные и безрудные кортландиты) и ортопироксеновых (амфиболовые бронзититы) кумулатов, но и следовавших за ними магнезиально-известковых двухпироксеновых разностей с богатым кальцием клинопироксеном — вебстеритов.

От ортопироксенитов и вебстеритов нормальная последовательность кумулатных производных ювенильной магмы, в наиболее свежем виде проявленных в интрузиве Кувалорог (а по измененным разностям опознаваемая и во фрагментах интрузивов Шанучского поля), продолжалась пойкилитовыми мелано-габброноритами, образованными по более рыхлым, не успевавшим пройти компакцию разностям кумулуса пироксенов, заключенных в ойкокрисы амфибола и плагиоклаза. Выше по разрезам макроритмов, с выходом плагиоклаза на котектику, ряды двухпироксеновых кумулатов завершались двухпироксен-плагиоклазовыми разностями состава ильменитовых лейкогабброноритов, комплементарных остаточным гранитоидным эвмагматитам.

Этот ряд рудосодержащих и безрудных пород-дифференциатов, образуемых магмой рудоносной формации, ближайшей к исходной, охватывает наибольшее их разнообразие, являясь самым полным («длинным») в КНП

по разнообразию пород — сравнительно с сокращавшимися рядами кумулатов контаминированных магм, дифференциацией которых он невоспроизводим.

Полная последовательность ассоциаций выделявшихся в исходной магме жидкой рудной и кристаллических силикатных безводных кумулузных фаз<sup>1</sup>, обеспечивавших ее дифференциацию и образование указанного выше ряда пород-кумулятов, включает: сульфидный расплав + Ol + Cr-Sp → Орх + Cr-Sp → Орх + Crх → Орх + Crх + Pl + Pl + Ap. Составы пород и минералов серии кумулатов исходной магмы КНП приведены в предыдущих публикациях (Селянгин, 2006, 2007, 2014б). В кумулатах не достигалась плотнейшая упаковка силикатных минералов, и их отвердевание завершалось кристаллизацией в разной степени эволюционировавших интеркумуляусных расплавов.

В самых ранних кумулатах, слагавшихся небольшой долей Cr-шпинели, оливином и сульфидной жидкостью, с переходом последней во вкрапленность и постепенным разубоживанием вверх по разрезу тела ее место занимал остаточный интеркумуляусный силикатный расплав менее мафического состава. После его реакции с оливином и кристаллизации ортопироксена остававшаяся его часть (до 20–25 об.%) целиком кристаллизовалась в паргасит-гастингситовый амфибол с небольшой долей флогопита-биотита, образуя кортландиты, — в то время как сульфидная фаза кумулуса оставалась существенно жидкой до полного становления интрузивов.

Ранняя кристаллизация амфибола предполагает содержание в магме до 3 мас.% воды (Morra, 1997). С учетом всех отмеченных данных состав исходной магмы КНП приблизительно рассчитан (Селянгин, 2014а) как удовлетворяющий образованию указанного ряда кумулатов: SiO<sub>2</sub> — 50.19, TiO<sub>2</sub> — 0.83, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 12.71, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 2.62, FeO — 7.15, MnO — 0.13, MgO — 13.57, CaO — 6.64, Na<sub>2</sub>O — 1.76, K<sub>2</sub>O — 1.32, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 0.08, H<sub>2</sub>O — 3.00

Близкая к исходной рудоносная магма КНП имела, таким образом, неординарный, высокомагнезиальный и одновременно кремнеземистый и водный (марианит-бонинитоподобный) исходный состав.

Экспериментально-петрологические исследования последних десятилетий (Kinzler et al,

<sup>1</sup> Используемые в работе символы минералов: Ol — оливин, Cr-Sp — хромистая шпинель, Орх — ортопироксен, Crх-богатый кальцием (клино-)пироксен, Pl — плагиоклаз, Am — кальциевый (Ca-) амфибол ряда паргасит-гастингсит, Phl — флогопит, Bi — биотит, Pl — ильменит, Ap — апатит.

2000; Sisson. Grove, 1993; Zimmer et al., 2010) показали, что водная высокомагнезиальная и кремнеземистая магма, подобная проявившейся в КНП, является, по всей вероятности, близкой к исходной для пород известково-щелочной серии, широко распространенной на Земле в обстановках островных дуг и активных континентальных окраин. В таком случае интрузивы КНП, рассматриваемые в качестве вероятных составных частей вертикально-протяженных магматических (вулканоплутонических) систем, могут быть информативными объектами для исследования эволюции известково-щелочной магмы в глубинных условиях, в своеобразной геодинамической обстановке и при разной степени взаимодействия с коровыми породами разного состава.

Первый макроритм расслоенности Восточно-геофизического интрузива, сформированный магмой, ближайшей к исходной для никеленозной формации, содержит соответственно первичный, самый ранний из возможных, парагенезис сульфидная руда — рудовмещающая порода. Таким образом, в своей нижней части интрузив может рассматриваться в качестве эталонного, типического для анализа начальных этапов дифференциации исходной магмы КНП и для оценки влияния на рудоотложение именно этого процесса.

Частично руды локализованы в контаминированных и измененных эндоконтактных породах боковых и нижней «краевых групп» I макроритма интрузива, сложенных хлоритом, тремолитом, антофиллитом и псевдоморфозами боулингита по оливиному, с реликтами паргасита и прослоями плагиоклазовых разностей. Основная доля руды сосредоточена среди кортландитов слоя Ia (рис. 2). В его основании можно выделить маломощный (до первых дм) линзующийся слой рудных оливинитов. В целом снизу вверх структура руды меняется от вкрапленно-гнездовой до массивной, сетчатой и сидеронитовой, вновь переходя к вкрапленной с постепенным разубоживанием к кровле слоя Ia и до исчезновения в слое Ib.

Соответственно, сульфидную жидкость в качестве «цемента» раннего оливинового кумулуса во все большей мере заменял остаточный силикатный расплав, в котором кристаллизовались реакционный по оливиному ортопироксен и затем интеркумуляусные паргасит и флогопит, фиксирующие все более ранние фазы в образующиеся кортландиты.

Близкому к первичному составу магмы первой порции заполнения интрузива и минимально измененному состоянию его ранних рудовмещающих оливинит-кортландитовых кумулатов соответствует, по данным В.В. Коно-

нова (Селянгин и др., 2006)<sup>2</sup>, также минимальная измененность содержащейся в них руды. Практически во всех своих структурных разновидностях она в основном представлена типоморфной для медно-никелевых месторождений ассоциацией пирротина, пентландита и халькопирита. Руды, отделявшиеся от исходной магмы в процессе ее дифференциации вместе с ранними окисным (Sp) и силикатным (Ol) минералами, можно в рабочем порядке называть **рудами кумулатов исходной магмы**.

Отметим главные особенности формирования руд во внедрении магмы, по составу наиболее близкой к исходной для КНП: 1) по всей вероятности, вся руда выделилась из магмы одной, первой порции заполнения Восточно-Геофизического интрузива; рудная нагрузка последующих, более дифференцированных порций, вместе с их оливиновыми кумулатами в основном осталась на глубине; 2) уже во время подъема и внедрения магма ликвидировала на сульфидную и силикатную фракции, с кристаллизацией в последней котектичных с рудой оливина и шпинели; 3) соответственно, отчасти руда фиксировалась в приконтактных, закалочных и конформно расслоенных зонах нижней части интрузива, однако ее выделение, разрастание и коалесценция капель продолжались и в основном объеме интрузивной камеры. Сульфидная жидкость осаждалась, опережая оливин, и формировала массивную руду и разности сетчатой и сидеронитовой структур в самых ранних оливиновых кумулатах, с переходом вверх по разрезу к постепенно разубоживающейся вкрапленной руде в кортландитах; 4) уже самая начальная дифференциация силикатной части исходной магмы с отделением оливина и малой доли шпинели сопровождала, таким образом, отделение в ней руды, являясь, по-видимому, необходимым и достаточным условием поддержания этого процесса, поскольку не вызывала абсолютного обогащения расплава железом, увеличивающим растворимость серы. Ни более глубокая продвинутость дифференциации, ни изменение состава магмы за счет ее внутрикамерной контаминации или смешения с другими порциями не были изначально необходимыми факторами рудоотложения; 5) количество руды в одной порции исходной магмы существенно меньше доли даже наиболее сродственных ей ранних ультраосновных дифференциатов (оли-

винитов–кортландитов), а скорость ее осаждения достаточно высока, чтобы в теле одного макроритма расслоенности одинаковые породы этого состава присутствовали и в качестве рудоносных (рудовмещающих), и в виде безрудных над ними; 6) соответственно, в этой ситуации безрудными оказываются и все более поздние ультрамафические дифференциаты — кумулаты ряда амфиболовых ортопироксенитов — вебстеритов. Продолжавшие этот ряд (в других интрузивах и их фрагментах) обогащенные известью и глиноземом мелано- и лейко-габброноритовые разности кумулатных пород также рудного вещества не содержат; 7) реконструкция полного ряда дифференциатов-кумулятов исходной магмы КНП — от рудных оливинитов и кортландитов до двупироксеновых лейкогабброноритов — дает основание предполагать, что если ее рудоносность была изначально присущим (или рано приобретенным) ее свойством, то выход любой породы из указанного ряда ее производных является признаком возможного существования их ранних рудных разностей на более глубоких уровнях. Самыми информативными в этом ряду кумулатных пород-индикаторов являются вебстериты и конечные двупироксеновые лейкогаббронориты.

Учет этих факторов вносит определенные коррективы в систему поисковых признаков сульфидного медно-никелевого оруденения. Вероятность наличия неглубоко залегающих руд возрастает для интрузивов с обнажающимися на дневной поверхности слоями их ультрамафических и, тем более, ультраосновных дифференциатов.

Та или иная степень оруденения, по данным геолого-съемочных и поисковых работ, свойственна почти всем оливиновым (кортландиты) или оливин-содержащим (более распространенные амфиболовые оливиновые пироксениты) дериватам магмы КНП практически во всех их широко рассредоточенных выходах (Поletaев, 1999). Это свидетельствует, что рудоносность их магмы была, скорее всего, не результатом случайного стечения благоприятных обстоятельств для отдельных ее порций и интрузивов (например, обычно предполагаемой ассимиляции серы коровых пород), а универсальным, изначально присущим или рано приобретенным ее свойством — либо как мантийной выплавки в равновесии с сульфидом (Лихачев, 2006), который мог растворяться в процессе ее подъема и вновь выделяться с началом дифференциации, либо как бессульфидной металлоносной магмы, внедрениям которой на далеко разобщенных участках в одинаковой степени «повезло» пересекать и усваивать породы серосодержащих толщ или только одну серу, выделяющуюся при их метаморфизме (Налдретт, 2003).

<sup>2</sup> Селянгин О.Б. (отв. исп.), Кононов В.В., Сидоров М.Д. и др. Сравнительное прогнозно-геохимическое изучение рудоносных и безрудных интрузий Шанучкого рудного поля с целью разработки стратегии ГРП (отчет по договору №2 от 29.06.2005г.). Архив НИГТЦ ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский, 2006. 250 с.

## КОНТАМИНАЦИЯ МАГМЫ ГЛИНОЗЕМИСТЫМ ВЕЩЕСТВОМ. ВАРИАЦИИ СОСТАВА И РУДОНОСНОСТЬ ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПОРОД

Наибольшее разнообразие серий свежих (не подвергшихся поздне- и постмагматическим изменениям) кумулатных производных магм, в разной степени контаминированных высокоглиноземистыми породами, проявлено в интрузиве Кувалорог. К сожалению, и он, и большинство других интрузивов КНП сложены неполными макроритмами раслоенности кумулатов, сокращенными как сверху — удалением (всплытием, выталкиванием новой магмой или смешением с ней) их конечных гранитоидных расплавов, так и снизу — со стороны их самых ранних (базальных), наиболее перспективных на оруденение мафит-ультрамафитовых кристаллических фракций. И если подобные (хотя и измененные) ранние рудные фракции магмы, контаминированной кремнеземистым веществом (кварцитами), проявлены в северной зоне КНП, в интрузиве месторождения Шануч, то базальные рудовмещающие слои кумулатов магм, контаминированных веществом, богатым глиноземом, ни в одном из изученных нами интрузивов не установлены. По-видимому, все пополнявшие их порции магмы претерпели докамерную дифференциацию, с оставлением своих возможных рудосодержащих ультрабазит-ультрамафитовых кумулатов на глубине (Селянгин, 2007). Об их возможном наличии и конкретном составе можно судить лишь косвенно, путем предположительных обратных экстраполяций составов кумулатов — от реально проявленных поздних частей их серий к вероятным начальным, а также по описываемым ниже экзотическим проявлениям оруденения, переотлагавшегося в контаминированной магме в конечные кислые дифференциаты апикальных частей отдельных интрузивов.

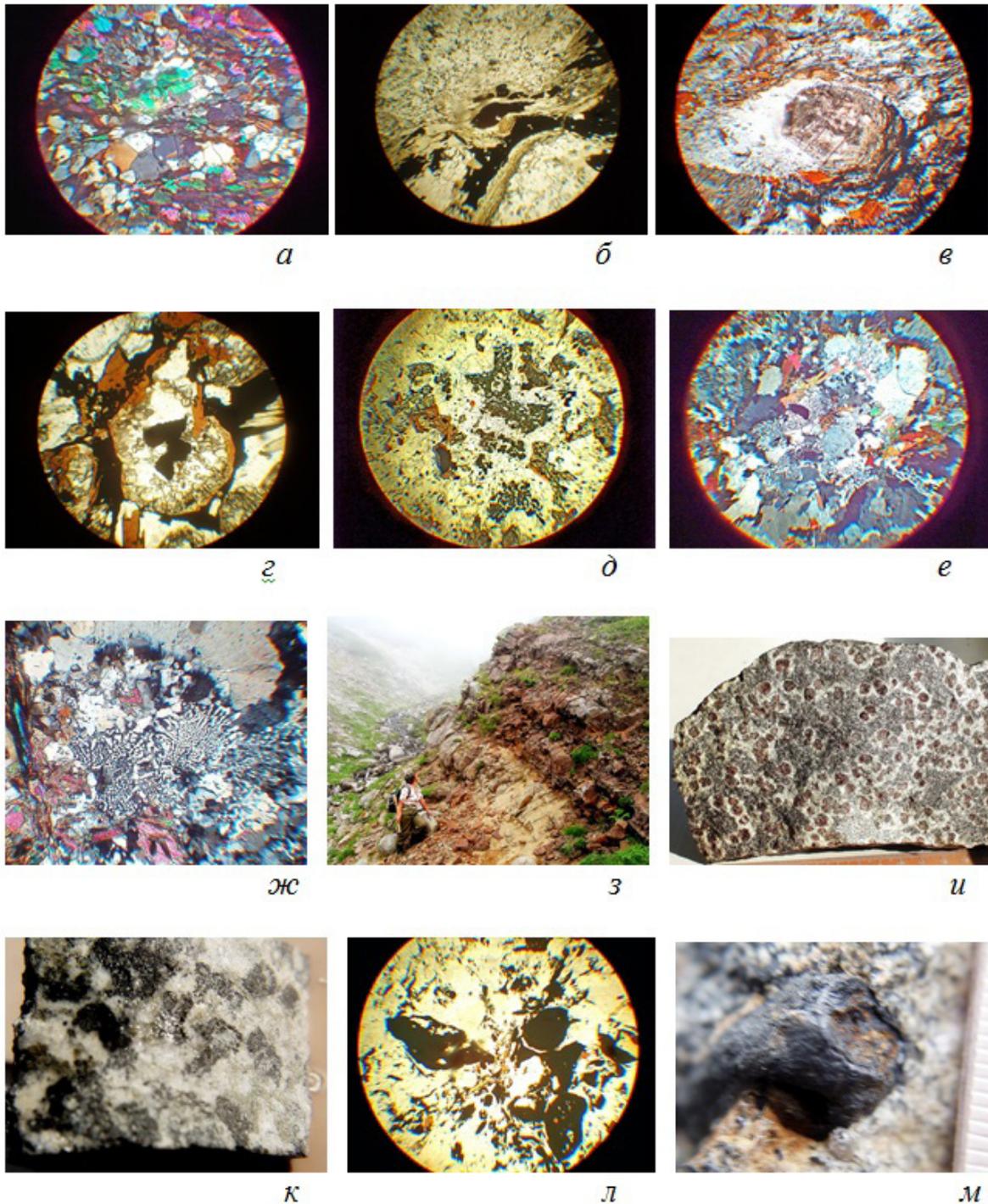
Богатые глиноземом контаминанты, воздействовавшие на рудно-магматические системы КНП, представлены, как отмечалось, вмещающими интрузивы, апопелитовыми-апопсаммитовыми углистыми метаосадочными породами нижне?-меловой камчатской (северная зона КНП) и верхнемеловой хейванской (южная зона) свит (рис. 3а–в). Крупные ксенолиты этих пород (рис. 3з), в разной степени ороговикованных, подвергавшихся перекристаллизации и парциальному плавлению, обычно сохраняют текстуры слоистости. Во многих ксенолитах с тонким чередованием исходно пелитовых и субаркозовых алеврито-псаммитовых слоев последние испытывали переплавление в диориты-плаггиограниты, изменяя текстуру породы

в мигматитообразную. Меланократовые слоики исходно пелитового состава в основном подвергались перекристаллизации в графит-содержащие биотит-гранатовые и шпинелевые породы со ставролитом и силлиманитом, с подчиненной долей кварца (рис. 3г, 3д).

Из-за присутствия во многих из этих ксеногенных пород биотит-кварц-полевошпатовой, субгранитоидной составляющей, ассимиляция магмой их ксенолитов начиналась ее выплавлением и усвоением, с дезинтеграцией и последующим растворением высокоглиноземистых релитовых фаз. Промежуточные стадии этого процесса бывают видны в сохранившихся небольших реликтах ксенолитов — по мелким участкам таких выплавов, позднее отвердевавших в агрегат полевого шпата с округлыми вростками кварца («капельный гранофир», рис. 3е, 3ж). В глубинных условиях становления интрузивов КНП плавление ксенолитов не имело характера дегидратационного: слюды в ксенолитах сохранялись, испытывая лишь частичную рекристаллизацию.

Возрастание от одной порции магмы к другой количества усвоенных глиноземистых компонентов в сохранившихся частях серий их кумулатов отражалось, как указывалось, в смене их кальциевых минералов фазами с большим отношением  $Al_2O_3/CaO$ : от клинопироксена к амфиболу и плаггиоклазу. В сохранившихся кумулатах порций магмы, близкой к исходной для КНП (то есть не подвергавшейся контаминации и либо практически недифференцированной на докамерной стадии — как в I макроритме интрузива Восточно-Геофизического в северной зоне КНП, либо частично дифференцированной — как в некоторых макроритмах интрузива Кувалорог в южной зоне), богатый кальцием клинопироксен в ранних ортопироксенит — вебстерит — мелано-габброноритовых частях кумулатных серий в значительной мере замещался глиноземистой фемической фазой — интеркумулусным Са-амфиболом (гастингситом). Однако в конечных кумулатах этих серий — при выходе плаггиоклаза в положение ликвидусной фазы — клинопироксен вновь обретал полный идиоморфизм, и вместе с плаггиоклазом и сохранявшимся ортопироксеном (+П+Ар) входил в котектику дупироксеновых лейкогабброноритов. При этом переходе резко убывавший в количестве гастингсит оставался в положении интеркумулусной фазы — в виде крупных тонкостенных ойкокрисст, включающих в качестве хадакриссталлов все минералы котектики.

В порциях магмы, поглощавшей некоторое умеренное количество глинозема, клинопироксен, начинавший выделяться в ультрамафит-мафитовых кумулатах вслед за ортопироксеном,



**Рис. 3.** Вмещающие интрузивы КНП глиноземистые породы, их ксенолиты — контаминанты в былых магмах и продукты их взаимодействия: *а* — гранатовый кварц-биотитовый кристаллический сланец у интрузива Кувалорог, ник.х; *б* — углистый гранат-биотит-кварцевый сланец вблизи интрузива месторождения Шануч, ник.//; *в* — узловатый двуслюдяной кварцевый сланец с порфиробластами ставролита, окрестности Восточно-Геофизического интрузива, ник.х; *г* — графитовый биотит-кварцевый роговик с атолловым гранатом, слой в крупном ксенолите в норитах интрузива Кувалорог, ник.х; *д* — шпинель-плеонаст (темное) в норите у контакта с ксенолитом, ник. //; *е* — следы парциального плавления ксенолита биотит-кварц-полевошпатового сланца в виде участков «капельного гранофира», интрузив Кувалорог, ник. х; *ж* — то же, в ксенолите гнейсо-гранита в одном из интрузивов Шанучского рудного поля, ник.х; *з* — гигантский блок-ксенолит контактово-метаморфизованных сланцев (отслоение былой кровли интрузива) в габброноритах Кувалорога; *и* — гранат-порфиroidная порода с плагиогранитной матрицей («плагиогранитный гранатит») вверху слоя норитов под экраном крупного ксенолита; *к* — овоидные стяжения графита в двуслюдяных гранат-силлиманитовых гранодиоритах интрузива Графитового, поперечник зерна 42 мм; *л* — то же в шлифе, ник.х; *м* — овоид графита с «начинкой» из окисленной сульфидной руды.

**Fig. 3.** Aluminous rocks hosted in the KNP, their xenoliths are contaminants inside the former magmas and the products of their interaction: *a* — garnet quartz-biotite crystalline schist in the Kувалорог intrusion, nicol (nic.) ×; *b* — carbon garnet-biotite-quartz shale near the intrusion of the Shanuch deposit, nic. //; *в* — knotty two-mica quartz shale with staurolite porphyroblasts, vicinity of the Vostochno-Geofizicheskiy intrusion, nic. ×; *г* — graphite biotite-quartz hornfel with an atoll garnet, a layer in a large xenolith in norites of the Kувалорог intrusion, nic. ×; *д* — spinel-pleonast (dark) in the norite in contact with xenolith, nic. //; *е* — traces of partial melting of xenolith of biotite-quartz-feldspar shale in the form of «drip granophyre» zones, the Kувалорог intrusion, nic. ×; *ж* — the same as in the xenolith of gneiss granite in one of the intrusions of the Shanuch ore field, nic. ×; *з* — giant block-xenolith of contact-metamorphosed schists (cleavage of the former roof of the intrusion) in gabbro-norites of Kувалорог; *и* — garnet (almandine)-porphyritic rock with plagiogranite matrix («plagiogranite granatite») at the top of the layer of norites под экраном of a large xenolith; *к* — ovoid graphite concretions in two-mica garnet-sillimanite granodiorites of the Графитовая intrusion, 42 mm core diameter; *л* — the same in the thin section, nic. ×; *м* — graphite ovoid with oxidized sulphide ore «filling».

замещался Са-амфиболом с более ранней стадии и в большей степени, сохраняясь в нем лишь в мельчайших реликтах. Вебстериты в этих сериях не формировались, а доля интеркумулусного Са- амфибола в их меланогабброноритовых частях была наибольшей (еще более возрастающая в биотитовых разностях подобных производных порций магм, обогащенных калием). В конечных кумулатах таких серий в котектику с ортопироксеном вместе с плагиоклазом (+П+Ар) и вместо клинопироксена входил гастингсит, становясь ликвидусным и кумулулусным минералом ортопироксен-амфиболовых лейкогабброноритов.

При максимальном насыщении магмы глиноземом он в мафитовых частях кумулатных серий «отбирал» в плагиоклаз также и долю известности потенциального Са-амфибола, а не использованные на его образование магnezия и железо формировали дополнительное количество ортопироксена. С выходом плагиоклаза на котектику серии кумулатов такой магмы заканчивались породами, не содержащими кальциевой фемической фазы, — ильменитовыми норитами, часто с гранатом или шпинелью (плеонастом), связывавшими избыточные глинозем и железо, с интерстициальными биотитом, куммингтоновым амфиболом и кварцем.

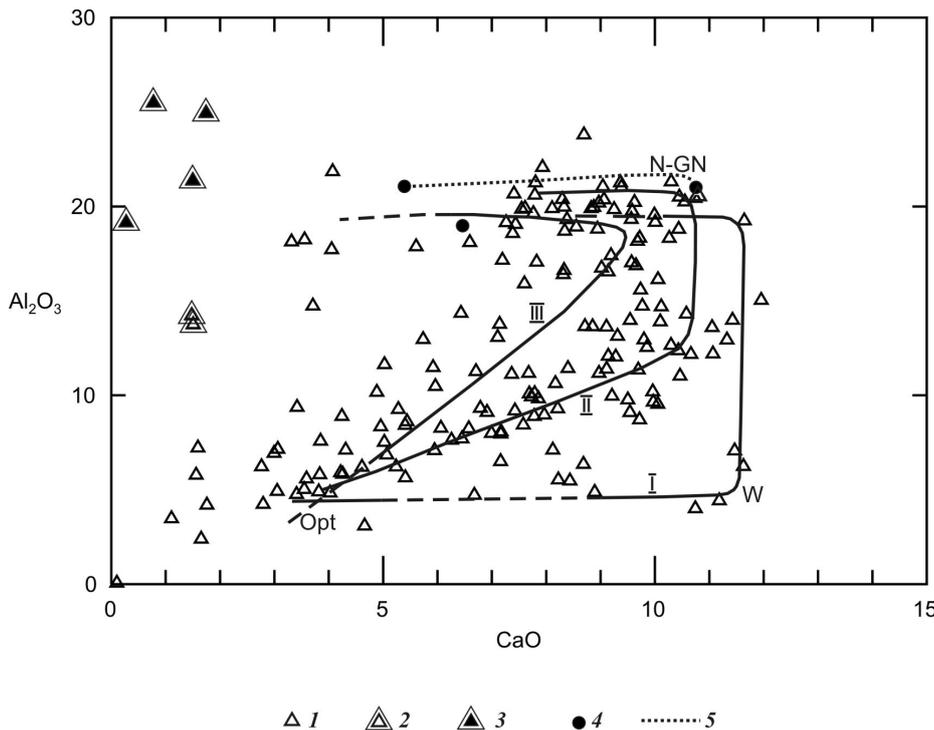
Таким образом, на примере прототипического для КНП интрузива Кувалорог, сохранившего наиболее свежие породы в разнообразных, хотя и неполных макроритмах расслоенности, в составе общей сложно-дифференцированной серии магматитов никеленосной формации выделяются частные серии, образованные порциями магмы, в разной степени контаминированной глиноземом. В порядке возрастания отношения  $Al_2O_3/CaO$  в кумулатных породах различных макроритмов и соответствующих изменений их минерального состава в интрузиве Кувалорог выделяются три основных типа таких серий: 1) производные минимально контаминированной магмы, близкой к исходной для КНП, но неполные (без ультраосновной, кортландитовой составляющей) макроритмы от амфиболовых ортопироксенитов через вебстериты до

двупироксеновых мелано- и лейкогабброноритов (рис. 4, серия I); на ортопироксенит-вебстеритовых участках они аналогичны серии ранних кумулатов Восточно-Геофизического интрузива и, очевидно, сокращены за счет докамерной дифференциации их магмы с оставлением на глубине их самых ранних и, возможно, рудосодержащих составляющих — кортландитов; 2) богатые амфиболом продукты умеренно обогащенной глиноземом магмы — серии от амфиболовых ортопироксенитов до ортопироксен-амфиболовых мелано- и лейкогабброноритов (рис. 4, серии типа II); 3) производные максимально обогащенной глиноземом магмы — от умеренно амфиболовых и амфибол-плагиоклазовых ортопироксенитов к мелано- и лейконоритам (рис. 4, серия III), обычно с аксессуарными гранатом или шпинелью.

Отдельный (4) тип сравнительно редких и маломощных (десятки м) серий кумулатов в интрузиве Кувалорог представляют не связанные с ассимиляцией глинозема слюдяные горнблендиты, образование которых обсуждается в третьей статье настоящей работы.

В интеркумулусе пород кумулатных серий, образованных магмами с возрастающей насыщенностью глиноземом, происходила сначала более ранняя (начиная с ортопироксенитов) кристаллизация вместе с амфиболом ойкокрист плагиоклаза, а потом и более быстрое увеличение его доли в более продвинутых дифференциатах, и более ранний его выход на котектику. При сравнении мафитовых частей обсуждаемых кумулатных серий переходы от одной к другой выглядят постепенными. Однако в своих конечных лейкогабброидных членах — с плагиоклазом на котектике — серии обнаруживают свою индивидуальность и дискретность, четко выраженную в их минеральном составе, но слабо уловимую по составу химическому.

Возвращаясь к проблеме отсутствующих в описанных сериях кумулатов их начальных ультрабазитовых членов, можно предполагать, что при значительной доле кремнекислой (гранитоидной) компоненты ксенолитов, усвояемой



**Рис. 4.** Обобщенные тренды вариаций состава (серии I – III) кумулятивных пород различных макроритмов расслоенности интрузива Кувалорог в координатах известь — глинозем (мас.%): 1 — породы интрузива; 2 — вмещающие суббаркозовые двуслюдяные, биотитовые с гранатом и ставролитом метаалевролиты и метапесчаники; 3 — апелитовые кварц-биотит-гранатовые с графитом роговики в блоках-ксенолитах в интрузиве; 4 — приконтактово-контаминированные породы интрузива: от гранатовых и шпинелевых с графитом лейконоритов до плагиогранитных гранатитов; 5 — тренд эволюции этих пород.

**Fig. 4** Generalized trends in composition variations (series I–III) of cumulative rocks of various macro-rhythms of the stratification in the Kuvallorog intrusion in the lime-alumina coordinates (wt.%): 1 — intrusive rocks; 2 — hosting subarcose two-mica, biotite with garnet and staurolite, meta-alevrolites and meta-sandstones; 3 — apopelitic quartz-biotite-almandine with graphite hornfels in blocks-xenoliths inside the intrusion; 4 — near-contact-contaminated intrusive rocks: from garnet and spinel with graphite leuconite to plagiogranite granatites; 5 — the trend of evolution of these rocks.

исходной рудоносной магмой, в ней могла происходить реакционная замена соответствующего количества оливина ортопироксеном, с возможным отложением на глубине рудных и безрудных кумулятов состава амфиболовых пойкилитовых гарцбургитов, или, возможно, оливин-плагиоклазовых ортопироксенитов.

### ФЛОТАЦИЯ СУЛЬФИДНЫХ РУД КАК СЛЕДСТВИЕ КОНТАМИНАЦИИ РУДОНОСНОЙ МАГМЫ

Своеобразный тип рудоносности, сформированный магмой, глубоко контаминированной глиноземистым веществом, проявлен в небольшом, поперечником в первые сотни метров, интрузиве Графитовом, расположенном в северной зоне КНП, в 3 км восточнее месторождения Шануч (Игнатьев и др., 1979)<sup>3</sup>. Он образован весьма парадоксальным и экзотичным способом концентрации высокоплотных сульфидных

рудных фаз — путем их флотации в магму-дифференциат состава высокоглиноземистых двуслюдяных с силлиманитом и гранат-биотитовых кварцевых диоритов, занимавшую былую апикальную часть опрокинутого к северу интрузива. В ее породах содержатся округленные резорбцией ксенолиты апелитовых углистых сланцев камчатской серии, алмадин, фибролитовый силлиманит, ставролит, отмечался корунд. Свое название интрузив получил из-за наличия в этих салических производных контаминированной глиноземом магмы обильной рассеянной примеси пылевидного и чешуйчатого графита и его линзовидных залежей протяженностью до 180 и мощностью до 35–40 м, вскрывавшихся канавами. Залежи насыщены лимонитом, в них установлено присутствие пирита, пирротина, халькопирита и ряда вторичных минералов медно-никелевых руд. Анализы проб из залежей показали содержания Ni до 0.16 мас.%, Cu до 0.21%, присутствие серебра и золота (Игнатьев и др., 1979).

Изучение части такой залежи по керну разведочной скважины (скв. 143 ЗАО НПК «Геотехнология», 2005 г.) показало, что она сформирована скоплением в кварцевых диоритах стяжений-овоидов графита (размерами от первых мм до 1.5–2.5 см (рис. 3к, 3л)). Их минераграфическое изучение В.Н. Кононовым<sup>2</sup> обнаружило

<sup>3</sup> Игнатьев Е.К., Игнатьева Л.И., Грибанов Б.В., Гумовский А.С. Отчет по поисково-разведочным работам в пределах северо-западной части Хим-Кирганикской рудной зоны (Шанучское рудное поле), проведенным Шанучским отрядом в 1977–1979 гг. Камчатский филиал ФБУ и ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу, г. Петропавловск-Камчатский. 1979. Т. 1. 138с.

во многих из них «начинку» изникелистого пирита с реликтами халькопирита (рис. 3м), замещившую, по всей видимости, раннюю трехминеральную халькопирит-пентландит-пирротиную ассоциацию вкраплений первичных руд.

Плавучесть рудных капель в кислом расплаве была, очевидно, обеспечена адгезией к ним частиц легкого графита, оболочки которого сыграли для них роль «спасательного круга». Вниз по разрезу тела (к его южному краю, оборванному разломом) диориты переходят в пойкилитовые биотит-амфиболовые меладiorиты с избытком фемических минералов над их котектикой с плагиоклазом, — уже не содержащие ни глиноземистых фаз, ни руды, ни графита.

Очевидно, первичный контакт графита с рудными вкраплениями и время, необходимое для его адгезии и всплытия композитных овоидов в эволюционировавшей магме могли быть обеспечены лишь при ассимиляции углистых сланцев мафической магмой на самых ранних этапах ее дифференциации, — в процессе рудоотделения, которому ассимиляция могла способствовать. Вероятно, комбинация этих факторов и обусловила появление необычного **типа комплексных флотационных графит-сульфидных медно-никелевых руд** в кислых перглиноземистых дифференциатах рудоносной мафической магмы. Облеканию графитом подвергались лишь вкрапления сульфидного расплава, — видимо, отстававшие при осаждении в формировавшуюся придонную рудную залежь. Не имея пока практического значения, рудопроявления описанного типа могут представлять верхние уровни былых «двухэтажных» рудных систем — с возможной более значимой концентрацией руд в мафических кумулатах их придонных зон.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Серии кумулатов ряда макроритмов расчлененности крупного интрузива Кувалорог, изученные в северо-западной трети его выхода, показывают качественно сходный для их магм высокоглиноземистый характер пород-контaminантов, усваивавшихся, однако, в разных количествах, с образованием соответственно различающихся по составу, но одинаково безрудных серий кумулатов. Вместе с выдержанностью режима формирования интрузива крупными, но редкими порциями-пополнениями магмы, единообразный характер ее взаимодействия с интродуцированными породами надо, очевидно, анализировать в ряду возможных причин их низкой рудной продуктивности. Имеющихся данных недостаточно для статистически обоснованных выводов, но по отмеченным показателям

определенную противоположность Кувалорогу представляют малые интрузивы Шанучского рудного поля, в магмах которых преобладающими контaminантами были кварциты. Разнообразные эффекты их усвоения обсуждаются в третьей, заключительной статье настоящей серии.

## Список литературы [References]

- Боуэн Н.Л.* Эволюция изверженных пород. М.–Л.: ОНТИ, 1931. 312 с. [*Bowen N.L.* The Evolution of Igneous rocks. Princeton University Press. 1928. Princeton, New Jersey. 334 p.]
- Лихачев А.П.* Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан, 2006. 496 с. [*Likhachev A.P.* Platinum-nickel-copper and platinum deposits. M.: Eslan. 2006. 496 p. (in Russian)].
- Мак-Берни А.Р.* Роль ассимиляции / Эволюция изверженных пород. Ред. Г.С. Йодер. М.: Мир, 1983. С. 301–331. [*McBirney A.R.* The Role of Assimilation / The Evolution of the Igneous Rocks. Edit. H.S. Yoder. New Jersey: Princeton University Press. Princeton, 1979. 527 p.]
- Налдретт А.Дж.* Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометаллических руд. СПб: СПбГУ, 2003. 487 с. [*Naldrett A.J.* Magmatic Sulfide Deposit of Nickel-Copper and Platinum-metal ores. SPb: SPbGU. 2003. 487 p. (in Russian)].
- Поletaев В.А.* Сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения и рудопроявления перидотит-пироксенит-норитовой формации Центральной Камчатки // Платина России. Т. III. Кн. 2. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. С. 19–199. [*Poletaev V.A.* Sulfide platinum-copper-nickel deposits and ore points of peridotite-pyroxenite-norite formation of Central Kamchatka / Platinum of Russia. Т. III. Iss.2. M.: ЗАО «Geoinformmark». 1999. P. 19–199. (in Russian)].
- Селянгин О.Б.* Кортландит—амфиболовый пироксенит—горнблендитовая серия расслоенного никеленосного интрузива Восточно-Геофизический, Шанучское рудное поле, Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 9–29. [*Selyangin O.B.* Cortlandite — amphibole pyroxenite — hornblendite suite of the layered nickeliferous intrusion Vostochno-Geofyzichesky, Shanuch ore field, Kamchatka // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2006. № 2(8). P. 9–29. (in Russian)].
- Селянгин О.Б.* Новые данные о строении и эволюции интрузива Кувалорог, Южная Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1. Вып. 9. С. 111–126. [*Selyangin O.B.* New

- data on structure and evolution of nickel-bearing intrusion Kuvalorog, South Kamchatka // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2007. № 1(9) P. 111–126. (in Russian).
- Селянгин О.Б.* К сравнительной петрологии интрузивов северной и южной зон Камчатской никеленосной провинции. Часть первая // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014а. № 1. Вып. 23. С. 168–184. [*Selyangin O.B.* Comparative petrology of intrusions in the northern and southern zones of the Kamchatka nickeliferous province. Part one // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2014а. № 2(23). P. 168–184. (in Russian)].
- Селянгин О.Б.* К сравнительной петрологии интрузивов северной и южной зон Камчатской никеленосной провинции. Часть вторая // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014б. № 2 Вып. 24. С. 95–115. [*Selyangin O.B.* Comparative petrology of intrusions in the northern and southern zones of the Kamchatka nickeliferous province. Part two // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2014б. № 2(24). P. 95–115. (in Russian)].
- Селянгин О.Б.* Контаминация магмы, особенности петрогенезиса и распределение рудного вещества в породах никеленосной формации Срединно-Камчатского массива (часть первая) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018а. № 2. Вып. 38. С. 22–33. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2018-2-38-22-33>. [*Selyangin O.B.* Magma contamination, petrogenesis features and distribution of ore substance in the rocks of nickeliferous formation of Sredinny-Kamchatka massif. Part 1 // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. № 2(38). P. 22–33. (in Russian)].
- Kinzler R.J., Donnelly-Nollan J.M., Grove T.L.* Late Holocene hydrous mafic magmatism at the Paint Pot Crater and Callahan flows, Medicine Lake Volcano, N. California and the influence of H<sub>2</sub>O in the generation of silicic magmas // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2000. V. 138. Iss. 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/PL00007657>.
- Sisson T.W., Grove T.L.* Experimental investigations of the role of water in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatism // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1993. V. 113. Iss. 9. P. 143–166.
- Zimmer M.M., Plank T., Hauri E.H. et al.* The Role of Water in Generating the Calc-alkaline Trend: New Volatile Data for Aleutian Magmas and a New Tholeiitic Index // Journal of Petrology. 2010. V. 51. № 12. P. 2411–2443. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq062>.

**MAGMA CONTAMINATION, PETROGENESIS FEATURES  
AND DISTRIBUTION OF ORE ELEMENT IN THE ROCKS  
OF NICKELIFEROUS FORMATION  
IN THE SREDINNY-KAMCHATKA MASSIF  
(Part 2)**

**O.B. Selyangin<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006,  
e-mail: selyang@kscnet.ru*

<sup>2</sup>*Scientific Research Geotechnological Centre FEB RAS Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002,  
e-mail: obs@kscnet.ru*

The article presents a discussion of contaminants in nickeliferous magmas of various composition and phase as metamorphic rocks and fluids. It describes distribution of different solid-phase contaminants (xenoliths) in intrusions and compositionally different accumulative rocks. Xenogenic material is represented both by host rocks with intrusions and deeper rocks with no surface outcropping. In order to estimate contamination effect on the variety of accumulative rock series and location of sulphide ores as a benchmark standard we use similar data on a ore-bearing intrusive rocks formed by nearly non-contaminated high-magnesian (parental) magma. Besides, the article describes contamination of magma by high-alumina coal slates as well as variety of forming series of its cumulative rocks and exotic floatation graphite-sulphide ores in aluminous granodiorites in one of the intrusive bodies.

*Keywords: nickeliferous magma; contamination; cumulative series; ore deposition; sulphide floatation.*