

УДК 551.2.3

## МАГМАТИЗМ И ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОРМИРОВАНИЯ РУДОНОСНЫХ ИНТРУЗИЙ НОРИЛЬСКОГО РАЙОНА (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ, РОССИЯ)

© 2024 г. Ю. Л. Ребецкий<sup>1</sup>, \*, В. Н. Войтенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, д. 10, ул. Б. Грузинская,  
123995 Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО “Норникель Технические Сервисы”, д. 11, Гражданский просп.,  
195220 Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: reb@ifz.ru

Поступила в редакцию 13.07.2023 г.

После доработки 24.09.2023 г.

После повторной доработки 08.09.2024 г.

Принята в печать 11.09.2024 г.

В статье представлены результаты исследования поля напряжений земной коры Норильского района при внедрении дифференцированных интрузий. Показано, что формирование в раннетриасовое время рудоносных интрузий, несущих медно-никелевую минерализацию, связано с эволюцией поля напряжений в коре на протяжении 50–100 млн лет. Установлено, что особенности напряженного состояния земной коры на начальном этапе обусловлены его глубиной и латеральной неоднородностью, возникшей до начала магматизма в раннепермское время в коре Хантайско-Рыбнинского вала и прилегающих структур. Возникновение этой неоднородности, имевшей унаследованный длительный характер, обусловлено формированием поднятий (валов) в регионе и процессами денудации поверхности этих поднятий с вертикальными амплитудами в пределах 1.5–2.5 км.

Поскольку процессы денудации приводят к подъему к поверхности пород, испытавших на больших глубинах закритическое течение, в верхней части и, частично, в средней части кристаллической коры Хантайско-Рыбнинского вала и прилегающих территориях возникли предпосылки к созданию напряженного состояния горизонтального сжатия. В нижней части коры Хантайско-Рыбнинского вала, а также в коре Норильско-Хараелахского прогиба и Тунгусской синеклизы сохранился режим горизонтального растяжения. Эта разница в напряженном состоянии коры определила особенности пространственной неоднородности развития вулканизма и внутрикорового магматизма Норильско-Хараелахского прогиба и Тунгусской синеклизы.

*Ключевые слова:* тектонофизика, магматизм, режим напряженного состояния, горизонтальное сжатие, давление магмы, магмопроводящие разломы, магматические интрузии, Норильско-Хараелахский прогиб, Хантайско-Рыбнинский вал, Тунгусская синеклиза

DOI: 10.31857/S0016853X24060043, EDN: RWJZXJ

### ВВЕДЕНИЕ

Формирование внутриплитных базальтовых провинций и, в частности, сибирских траппов связывают с влиянием мантийного плюма на земную кору [8, 9, 14, 21, 22, 25, 45, 48, 52, 56, 58, 60, 62, 66, 69]. Предполагается, что центр плюма находился под Норильским районом, где наблюдается максимальная мощность вулканогенных комплексов [23, 76]. Для центра трапповой провинции Норильского района характерны наиболее мощные разрезы туфолавовой толщи лавового типа, и ареальный тип магматизма. Извержения носили спокойный характер, без образования возвышенных в рельефе крупных вулканических построек, и происходили за счет излияния через

множество мелких каналов, представленных современными дайками и силлами.

Большая часть магматических интрузий в отложениях девонского, каменноугольного, пермского и триасового возрастов представлена силлами, реже встречаются дайки, штоки и сложные по форме полого секущие или субпластовые ветвящиеся трубообразные тела (хонолиты). Интрузии имеют различный состав (от пикритовых габбро-долеритов до лейкократовых габбро). По степени дифференцированности интрузии подразделяются на:

- недифференцированные (изотропные);
- слабо дифференцированные;
- дифференцированные (расслоенные).

Изотропные и слабо дифференцированные интрузии являются безрудными, а в расслоенных интрузиях встречаются рудопоявления и различные по масштабам месторождения сульфидных Au–Pt–Cu–Co–Ni и Pt-малосульфидных руд. Большая часть медно-никелевых рудных тел месторождений пространственно связана с дифференцированными лентовидными хонолитообразными массивами габбро-долеритов мощностью от первых метров до 300 м.

В Норильском районе выделяют десять циклов магматических излияний. Главные дифференцированные интрузии относят к пятому, шестому и седьмому циклам [31].

По результатам анализа вариаций химического состава пород туфолавоваго толщи Норильского района предложено разделение трапповой формации на три разных типа, при этом каждый тип имеет источник магм и соответствующий тектономагматический этап [44]:

– первый этап (магматизм) связан с глубинным обогащенным мантийным источником, в котором формировались покровы трахибазальтов и трахиандезибазальтов;

– второй этап (вулканизм) также связан с глубинным истощенным источником, претерпевшим фракционную дифференцированность, в котором изливались коматиитоподобные лавы пониженной основности;

– третий (трапповый) этап связан с малоглубинными источниками, вероятно, внутрикорового расположения, поставлявшими толеитовые базальты.

В работе [24] развиваются представления о двух этапах вулканизма. Первый этап развития магматизма связан с континентальным рифтогенезом, во время которого преимущественно изливались расплавы глубинного происхождения. Со вторым этапом вулканизма связано возникновение в нижней – верхней коре магматических камер, в которых формировались дифференцированные интрузии.

При объяснении уникальности медно-никелевых месторождений Норильского района основные расхождения исследователей связаны с особенностями сульфидизации рудных интрузий (мантийная, коровая) и механизмом обогащения месторождений (внутрикамерный в приповерхностных условиях, в промежуточных абиссальных магматических очагах).

По мнению части исследователей уникальность медно-никелевых руд Норильского и Талнахского рудных узлов обусловлена мощностью

магматического извержения, произошедшего в конце пермского и начале триасового периода ( $251 \pm 3$  млн лет), а также особенностями строения коры, благоприятствовавшего процессам дифференциации магматических интрузий [57, 67].

Также существует несколько разных концепций, объясняющих механизм увеличения концентрации медно-никелевых руд в интрузиях, в основу которых заложен механизм кристаллизационно-гравитационной дифференциации [47, 48].

Наибольшее распространение получило предположение о формировании руд в условиях открытой магматической системы [35, 36, 60, 61, 63].

В модели Радько–Налдретта [36, 72] формирование дифференцированной интрузии происходит в результате многократного поступления магмы в камеру, типа гипабиссальный суб-вулкан, имеющей подводящий и выводящий каналы. Уникальность месторождений этой модели не связана с их пространственным положением в структурных зонах провинции. Модель Радько–Налдретта только способствует прогнозу расположения рудных тел внутри магматической камеры с заведомо известной геометрией.

В другой гипотезе образования норильских месторождений в условиях закрытой системы, предполагающей вынос сульфидов в капельном виде напрямую из мантии, прогнозировались структурно благоприятные участки земной коры. Наиболее благоприятными участками для этого процесса рассматривались краевые зоны платформы с сосредоточенными здесь глубинными разломами [28–30].

В работах [4, 5, 26, 27] считается, что уникальные рудные залежи возникают в процессе фракционирования расплава, начинающегося при его движении в магматической колонне при кристаллизационной дифференциации и гравитационной сепарации. В генетических моделях рассматривается возможность фракционной дифференциации и в промежуточных внутрикоровых магматических очагах – камерах [19, 20, 34]. В накоплении металлов платиновой группы в рудах могло иметь значение длительность пути движения сульфидов от источника до магматической камеры.

Изучение изотопного состава циркона Hf–O *in situ* в сочетании с данными по изотопам Nd из магматических пород, выполненное в работе [70] для Талнахского рудного узла, показало, что троктолит с сульфидсодержащей такситовой текстурой из базальной части интрузии имеет высокое значение  $\delta^{18}O$ . Это указывает на возможное участие

компонента земной коры при формировании сульфидсодержащих пород с такситовой текстурой.

В работе [74] показано, что основные объемы серы в субвулканической интрузии, связанной с сибирскими траппами, поступают из морских эвапоритов. Загрязненная магма была способна растворять на порядок больше серы, чем чистая базальтовая магма мантийного происхождения.

В работе [33] также указывается отличительная черта формирования Норильских рудных узлов за счет обогащения мантийного вещества коровым веществом (изначально – серой) с формированием богатых сульфидных Cu–Ni-месторождений.

Требуемые большие объемы серы норильских месторождений невозможно объяснить ее растворением в процессе формирования базальтового расплава [36].

В работе [1] рассматривалась возможность образования сульфидной жидкости в процессе миграции расплава через серосодержащие породы земной коры. Инфильтрационно-автометасоматическая гипотеза образования норильских руд получила развитие в работах В.В. Золотухина [15–18].

В работе [46] в качестве источника сульфидной серы рассматривается сульфатная сера осадочного ангидрита. Считается, что восстановление сульфатной серы происходило в процессе абиогенной сульфатредукции при взаимодействии углеводов с ангидритом. Показано, что объемы сульфатной серы эвапоритов и углеводов угленосных и нефтегазоносных отложений норильского района достаточны для осуществления таких процессов.

Анализ распределения всех типов силлов и геофизически идентифицированных магматических очагов в плане [78] показал, что на промежуточных и верхних уровнях земной коры дифференцированные силлы ограничены неглубокими участками Норильско–Хараелахского прогиба.

Предполагается, что часть магмы оставалась в камерах земной коры среднего глубинного уровня, где происходило насыщение и накопление сульфидов [6, 78]. Позднепротерозойские породы и породы палеозоя (мощностью до 6–7 км), содержащие медную минерализацию осадочного происхождения и эвапоритовые толщи, возможно, внесли дополнительный вклад в обогащении металлами рудоносных интрузивов.

Важно отметить, что разные взгляды на глубины формирования внутрикоровых очагов, на возможность остановки продвижения и длитель-

ного прохождения магмы в колоннах, а также на формирование рудоносных интрузий вблизи поверхности обычно связывают с особенностью структурного строения Норильского района [24].

В настоящей статье мы приводим данные наших исследований и покажем, что возможность остановки продвижения магмы в разломе (колонне), формирование внутрикоровых пластообразных магматических очагов и образование в приповерхностных условиях карандашеподобных и лентовидных интрузий (хонолитов), в которых находятся большинство богатых рудных залежей, следует связывать со специфической особенностью геодинамической обстановки – напряженного состояния земной коры, эволюционировавшего в коре в процессе магматизма.

Целью настоящей статьи является установление закономерностей эволюции напряженного состояния коры в процессе магматизма и роли этих изменений в формировании внутрикоровых магматических очагов, а также интрузий различного типа (дайки, силлы, хонолиты) в верхней части осадочного чехла.

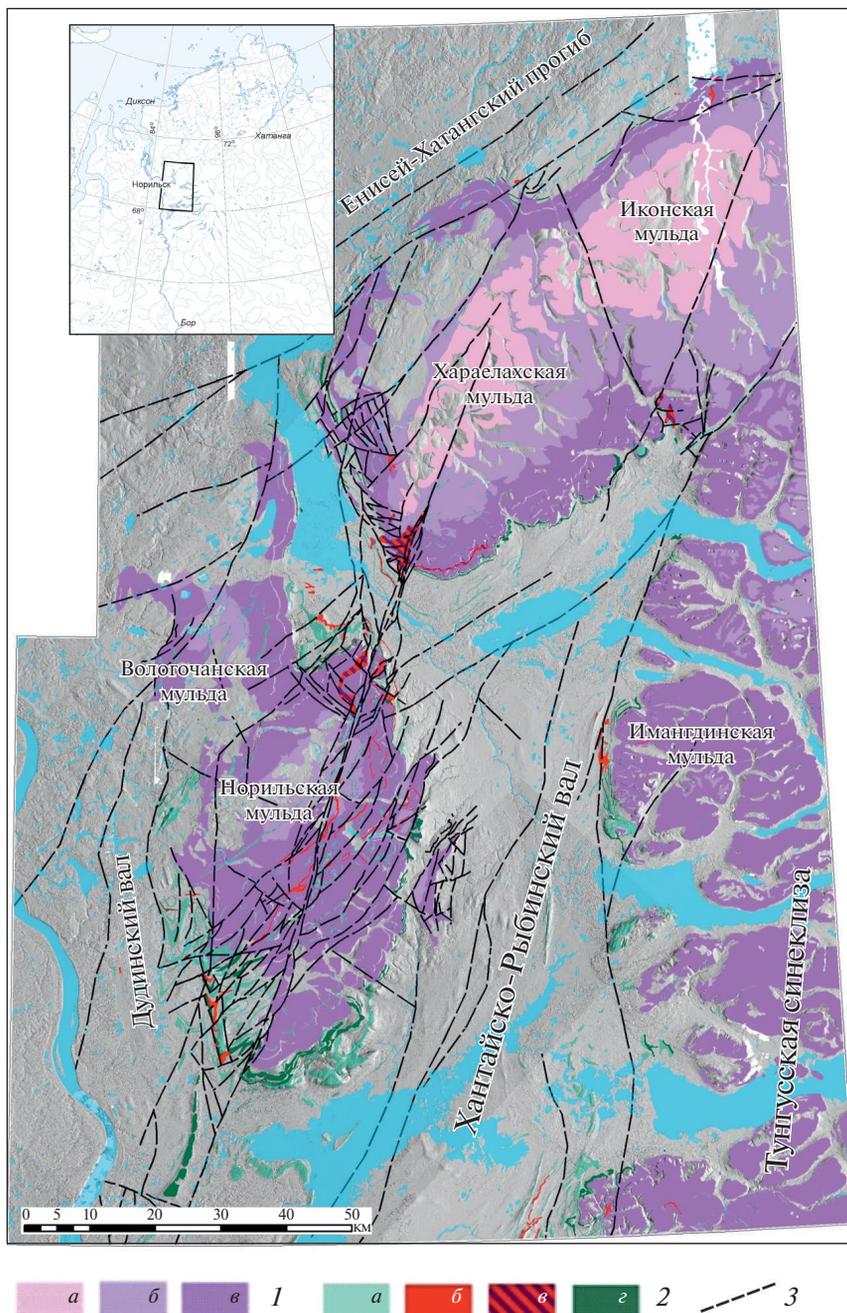
## ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

На северо-западе Сибирской платформы прежде всего выделяется структура первого порядка – Тунгусская синеклиза, северо-западная окраина которой располагается вдоль юго-восточной границы Норильского района [36, 50, 53, 54] (рис. 1).

К структурам второго порядка этого региона относится Норильско-Дельканский авлакогеноподобный прогиб, располагающийся по диагонали с юго-запада на северо-восток, западная треть которого именуется Норильско-Хараелахским рифтогенным прогибом (далее по тексту – Норильско-Хараелахский прогиб) [32]. Этот прогиб ограничен с юго-востока более древним Хантайско-Рыбнинским валом, с запада и северо-запада – Дудинским валом, которые также являются структурами второго порядка. Норильско-Хараелахский рифтогенный прогиб прослежен в северо-восточном направлении на 350 км через всю территорию Норильского района.

К структурам третьего порядка на северо-западе Сибирской платформы относятся следующие структуры [36].

- Впадины (мульды):
  - Норильская;
  - Хараелахская;
  - Ламско-Хантайская.



**Рис. 1.** Положение геологических структур Норильского района.

На врезке показано (прямоугольник) положение региона исследования.

1 – туфолавовая тоша: а – T1km+sm, б – T1mk+hr, в – P3iv+sv-nr;

2 – интрузии: а – Оганеровского, Моронговского и Далдыканского комплексов (T1-2), б – Норильского, Моронговского и Zubовского комплексов (T1); в – то же, в проекции на поверхность; г – Пясинского и Ергалахского комплексов (P3); 3 – разломы

- Куполовидные поднятия, разделяющие впадины:
  - Убойнинское;
  - Пясинское;
  - Микчангдинское;
  - Каланское.

Хантайско-Рыбинский вал имеет север – северо-восточное простирание и длину до 120 км при ширине 20–30 км. Он формировался в пределах Норильско-Харалахского прогиба с раннего кембрия в процессе конседиментационного роста валообразных поднятий в результате активизации

Норильско-Хараелахского разлома и шовной зоны (сутуры), совпадающей с современным положением Имангдино-Летнинского глубинного разлома.

Рыбнинское и Хантайское конседиментационные поднятия представляли собой мелководный барьер, разделявший воды глубоководной части открытого моря от соленых вод, охватывающей всю западную и юго-западную часть Сибирской платформы [32].

В среднем палеозое – это относительно приподнятая область, ограниченная конседиментационными флексурами. В позднем палеозое в результате интенсивного роста структуры происходил размыв слагающих ее образований, величина которого в западной части вала достигала 3000 м.

В работе [24] отмечается разница в строении западного и восточного борта Хантайско-Рыбнинского вала, сформированная еще до излияния первых порций магматических расплавов на поверхность в этом районе.

Имангдино-Летнинский разлом (ИЛР) является дизъюнктивной структурой первого порядка, сформировавшейся в раннем докембрии в доплатформенный этап развития, разделяющей разновозрастные складчатые комплексы в составе архейско-нижнепротерозойского фундамента [36]. Имангдино-Летнинский разлом проходит по осевой зоне Ламско-Хантайской впадины и отделяет Тунгусскую синеклизу от молодой платформы с байкальским основанием.

Норильско-Хараелахский разлом относится к дизъюнктивным структурам второго порядка и так же, как Хантайско-Рыбнинский вал, имеет север–северо-восточное простирание и протяженность 350 км. Ширина зоны разрывных и складчатых нарушений – 10–20 км.

На всем протяжении разлом осложнен крупными опережающими разрывами Микчангдинского, Абагалахским, Ергалахским и другими северо-восточного простирания, образующими разветвленную сеть дислокаций к востоку от основной его зоны. Разлом относится к структурам второго порядка и имеет ряд признаков трансформного разлома по отношению к рифтам Енисейско-Ханганского прогиба. Он представляет осевую зону одноименного прогиба и прослеживается далее на юг за пределы Норильского района до р. Игарки.

В породах дотунгусского времени Норильско-Хараелахский разлом проявлен в виде флексуорообразной складки, что свидетельствует о глубинности структуры и ее докембрийском возрасте. Этот разлом считается основной магмо- и рудо-

контролирующей зоной в Норильском рудном районе и контролирует размещение промежуточных магматических очагов.

Многочисленные сбросо-сдвиги северо-восточного простирания и кинематически связанные с ними надвиги образуют с зонами Имангдино-Летнинского и Норильско-Хараелахского разломов единую сложную тектонопару, свидетельствуя о крупных сдвиговых (правый сдвиг) перемещениях вдоль этих зон в позднем мезозое.

Норильско-Хараелахский и Имангдино-Летнинский разломы являются главными магмоконтролирующими структурами Норильского рудного района, что подтверждено данными аэромагнитной съемки магнитных аномалий в виде цепочек, тяготеющих к трассам разломов [43].

## ЭВОЛЮЦИЯ КОРОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НОРИЛЬСКОГО РАЙОНА

В нашем исследовании мы будем опираться на представления о ведущей роли промежуточных внутрикоровых магматических очагов и условий, определивших достаточно длительное нахождение магмы в колоннах–разломах и формирование рудоносных дифференцированных силлов [29, 35, 72, 78].

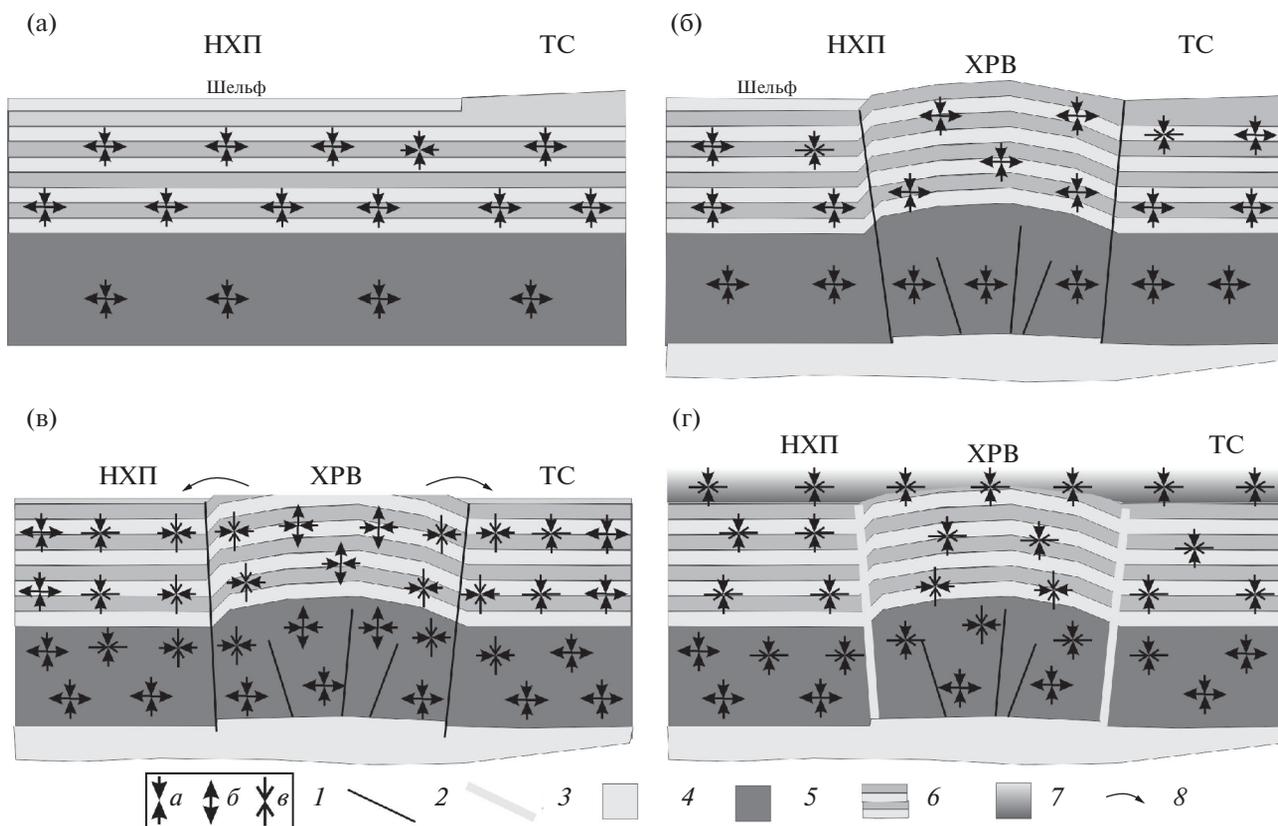
При этом полагаем, что главная роль в образовании таких очагов связана не столько со структурными особенностями коры Норильско-Хараелахского прогиба, сколько с особенностями эволюции напряженного состояния коры Рыбнинского вала. Поэтому проблема образования норильских месторождений может быть решена только при всестороннем анализе эволюции геодинамики, тектоники и процесса магматизма всей провинции.

Для условий Норильского района нами исследована эволюция корового напряженного состояния, как на стадии до начала (каменноугольный и пермский периоды), так и в ходе самого траппового магматизма (пермский и триасовый периоды).

Представленная выше краткая часть обзора тектоники Норильского района позволила выявить несколько факторов ее эволюции, способных определить режимы напряженного состояния в различных субрегиональных геологических объектах (рис. 2).

### *Формирование осадочного бассейна*

Формированию осадочного бассейна в режиме пассивной континентальной окраины отвечает ориентация главных напряжений, показанная на



**Рис. 2.** Схемы напряженных состояний в вертикальном разрезе осадочного чехла и кристаллической коры Хантайско-Рыбнинского вала, а также прилегающих структур (а) в начале палеозоя; (б) к концу палеозоя (кембрий–начало пермского периода) без учета эрозии; (в) к концу палеозоя с учетом эрозионных процессов Хантайско-Рыбнинского вала; (г) в триасе, в период магматических излияний.

- 1 – оси главных напряжений: *a* – максимального сжатия, *b* – минимального сжатия или девиаторного растяжения, *v* – промежуточного главного напряжения;
- 2 – коровые разломы, в том числе Норильско-Хараелахский (НХР) и Имангдино-Летнинский (ИЛР), ограничивающие Хантайско-Рыбнинский вал с запада и востока;
- 3 – разломы (НХР и ИЛР) на стадии магматизации коры;
- 4 – магматический подкорový очаг;
- 5 – кристаллическая кора;
- 6 – осадочный чехол;
- 7 – эффузивная тоша;
- 8 – направление эрозионного сноса

рисунке 2, а. Будем считать, что геодинамический тип напряженного состояния, именуемый как горизонтальное растяжение (наибольшее сжатие субвертикально), имел место в земной коре всего осадочного бассейна в раннем и среднем палеозое, до начала конседиментационного роста Хантайско-Рыбнинского вала.

Поскольку на востоке Тунгусская синеклиза была приподнята над осадочным бассейном, то в верхней части коры Хантайско-Рыбнинского вала уровень напряжений горизонтального сжатия мог быть больше, чем к востоку от него.

Начиная с кембрия происходит поднятие Хантайско-Рыбнинского вала, которое сопрово-

ждается частичной эрозией. В этот период идет ускоренное развитие Норильско-Хараелахского прогиба, куда происходил снос эродированного материала. Показан прогноз напряженного состояния, отвечающего только стадии формирования двухкилометрового поднятия Хантайско-Рыбнинского вала (без учета эрозии) (см. рис. 2, б).

Поднятие участка Норильско-Хараелахского прогиба может быть связано с формированием в мантии обширного магматического очага и наличием двух глубинных Норильско-Хараелахского и Имангдино-Летнинского разломов, реализовавших горстообразное воздымание Хантайско-Рыбнинского вала.

Формирование рельефа в 1–2 км как на конседиментационной стадии, так и на последующих этапах развития структур приводит к появлению большой разницы между горизонтальными напряжениями в коре для осевых частей области поднятия и прогиба, она может достигать 40 МПа. Из-за этого в верхних слоях коры (глубины до 5 км) Норильско-Хараелахского прогиба и Тунгусской синеклизы, расположенных в непосредственной близости (до 20–30 км) от Хантайско-Рыбнинского вала, должны возникать дополнительные сжимающие напряжения, которые сглаживают контраст в напряжениях для осевых частей. Можно полагать, что в горизонтальном направлении, ортогональном простиранию Хантайско-Рыбнинского вала, в ближних к нему зонах будет действовать промежуточное главное напряжение (наибольшее латеральное сжатие), которое далее по латерали переходит в наименьшее сжатие (см. рис. 2, б).

При формировании больших высот поднятий уровень этих дополнительных напряжений латерального сжатия в верхней части коры Норильско-Хараелахского прогиба и Тунгусской синеклизы становится еще большим, что может привести к переиндексации главных напряжений, действующих в вертикальном и горизонтальном направлениях. Таким образом, в горизонтальном направлении, ортогональном простиранию Хантайско-Рыбнинского вала, могло действовать наибольшее сжатие, что определило изменение геодинамического типа напряженного состояния с горизонтального растяжения на горизонтальное сжатие.

На глубинах более 7 км влияние поднятия Хантайско-Рыбнинского вала уменьшается, и на больших глубинах далее вплоть до фундамента имеет место напряженное состояние горизонтального растяжения.

### *Процессы эрозии*

Эрозионные процессы, уменьшающие высоты рельефа для Хантайско-Рыбнинского вала на 3 км, способны повысить уровень горизонтального сжатия за счет остаточных напряжений сжатия пород, пришедших вверх с больших глубин [7, 38–41, 77]. Это приводит к тому, что в Хантайско-Рыбнинском вале на глубинах до 10–15 км такое повышение может достигать на 30–50 МПа, что должно было привести к смене геодинамического типа напряженного состояния на режим горизонтального сжатия (см. рис. 2, в).

На больших глубинах также должен был происходить переход в режим горизонтального сжатия,

но превышение горизонтальных напряжений над вертикальным литостатическим давлением будет меньше. В ближних участках соседних к востоку и западу от Хантайско-Рыбнинского вала тектонических провинций также повышается уровень напряжений горизонтального сжатия, что могло привести к формированию здесь режима горизонтального сжатия. Этот локальный механизм формирования режима горизонтального сжатия отличается от механизма глобального сжатия литосферы, вызванного дальнедействующим влиянием напряжений от границ плит [71].

Напряженное состояние (см. рис. 2, в) пришлось на конец пермского – начало триасового периодов, т.е. соответствует началу магматических процессов в коре Норильского района.

В течение магматических процессов в пермский и триасовый периоды Хантайско-Рыбнинский вал трижды испытывал поднятие и эрозию [44]. В связи с этим, механизм формирования напряженного состояния горизонтального сжатия в пределах верхних слоев Хантайско-Рыбнинского вала и сопредельных с ним западного и восточного бортов Норильско-Хараелахского и Имангдино-Летнинского разломов мог возобновляться в новой структурно-стратиграфической обстановке.

Можно ожидать, что такая неоднородность напряженного состояния вкрест Хантайско-Рыбнинского вала немного ослабевала с юго-запада на северо-восток, где высоты рельефа были меньше.

Кроме этой схемы эволюции напряженного состояния вкрест исследуемых структур Норильского района, нами, по результатам тектонофизической реконструкции, выполненной по данным о простирании региональных сдвигов, взбросов, сбросов и магматических даек пермского и триасового возрастов, была разработана схема латерального изменения геодинамического типа напряженного состояния и ориентации главных осей напряжений (рис. 3).

По мере удаления от Хантайско-Рыбнинского вала падает уровень напряжений горизонтального сжатия, что приводит к смене геодинамического типа напряженного состояния от горизонтального сжатия к горизонтальному сдвигу и далее к горизонтальному растяжению, что также соответствует прогнозной схеме (см. рис. 2, в).

Следует отметить существование на северо-восточном ограничении Хантайско-Рыбнинского вала в зоне Микчангдинского разлома условий напряженного состояния (переход от горизонтального сжатия к горизонтальному сдвигу),



**Рис. 3.** Схема латеральной ориентации главных напряжений в консолидированной коре (нижнепермско–триасовой туфолаваовой толщи) Норильского района перед началом магматизма в конце пермского периода, полученная по результатам тектонофизического анализа разрывных структур.

1 – режимы напряженного состояния: *a* – горизонтальное сжатие, *б* – горизонтальный сдвиг, *в* – горизонтальное растяжение; 2 – главные напряжения сжатия: *a* – наименьшего, *б* – промежуточного, *в* – наибольшего; 3 – наиболее крупные разломы; 4 – озера и р. Енисей; 5 – мулды

близких к тектонофизическим условиям перехода от сжатия к сдвигу (см. рис. 2, в).

В работах [10, 50] было отмечено, что в период базальтового магматизма в Норильском рудном районе в краевых частях рифтов по мере нарастания амплитуды прогибания наблюдалась обстановка сжатия, что определяло формирование здесь конседиментационных валообразных поднятий и надвиговых зон [14, 49].

### ***Формирование туфолавовой толщи в триасовом периоде***

Возникновение в триасовом периоде вулканической покрывки (туфолавовой толщи) мощностью в несколько километров можно рассматривать как фактор дополнительной вертикальной нагрузки на породы коры дотриасового возраста. В этом случае в коре под вулканической покрывкой появляются дополнительные напряжения вертикального литостатического сжатия и меньшие по величине дополнительные напряжения горизонтального сжатия (в упругом состоянии меньше на 30–35%, в закритическом – на 5–10%).

Наиболее сильно это изменяет напряженное состояние коры Хантайско-Рыбнинского вала в примыкающих к нему с запада и востока структурах Норильского прогиба и Тунгусской синеклизы, в которых в пермское время действовал режим горизонтального сжатия (см. рис. 2, г).

Это приводит к тому, что здесь мог смениться режим напряженного состояния на горизонтальное растяжение с ориентацией наибольшего горизонтального сжатия (меньшего, чем вертикальное литостатическое давление), ортогональном простиранию Хантайско-Рыбнинского вала.

Заметим, что, если на схеме распределения напряжений (см. рис. 2, г), рассматривать направления действия максимального и минимального горизонтального сжатия, то они также соответствуют результатам тектонофизической реконструкции (см. рис. 3).

Отложения триасового возраста формировались в условиях отсутствия внешнего (горизонтально) нагружения – сжатия и, следовательно, их напряженное состояние определяется только собственным весом. Таким образом, над породами центральной части Хантайско-Рыбнинского вала девонско–пермского возраста, где имеет место горизонтальное сжатие, лежат триасовые породы с субвертикальной ориентацией наибольшего сжатия – режим горизонтального растяжения.

Важно отметить, что северо-восточное окончание Хантайско-Рыбнинского вала в пределах Микчангдинского разлома также попадает в представленную схему формирования особого напряженного состояния, сочетающего горизонтальное растяжение в верхней эффузивной и нижней частях осадочного чехла и кристаллического фундамента с горизонтальным сжатием в средней части осадочного чехла (породы силурийского–верхнепалеозойского возрастов).

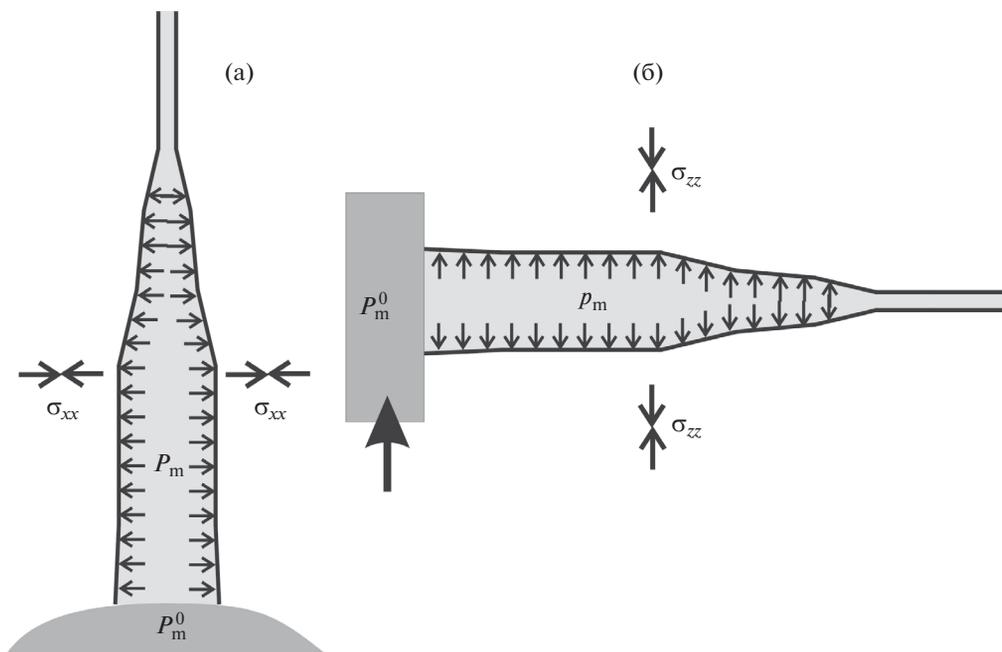
Выполненный нами прогноз напряженного состояния коры исследуемого района на стадии до начала вулканизма способен объяснить появление режима горизонтального сжатия в коре Хантайско-Рыбнинского вала и его окружения (см. рис. 2).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### ***Формирование магмопроводящих разломов и сопряженных с ними интрузий в процессе магматизма***

Мы рассмотрим главные физические положения, определяющие возможность продвижения магмы по разломам земной коры, на основе которых будет изложен тектонофизический подход по прогнозу глубин формирования промежуточных магматических камер (очагов) в земной коре. Следует отметить, что, хотя тектонофизический подход дал возможность проведения анализа эволюции одномерных (1D) моделей напряженного состояния коры, но его алгоритм был основан на результатах трехмерных геомеханических расчетов продвижения магм по субвертикальным разломам, выполненным в рамках хозяйственных работ для Норильского района.

Математические и физические модели формирования даек и силлов, так же, как и механизм трансформации коровых разломов в магмопроводящие колонны, базируются на требовании превышения давления магмы ( $P_m$ ) в ее фронте и внутри трещины – разлома над обжимающими напряжениями в окружающем массиве [63–65, 68, 73–75]. Этот момент обычно упускается из виду, когда движущие силы подъема магмы по трещине связывают с меньшей ее плотностью по отношению к окружающим породам. В работе [41] показано, что более плотная магма также способна подниматься по разлому до каких-то глубин земной коры (иногда и до поверхности) именно за счет того, что в условиях напряженного состояния, вызванного действием массовых сил тяжести



**Рис. 4.** Схемы соотношения обжимающих напряжений и давления магмы (по [75]).

(а)–(б) – соотношения: (а) – в вертикальном магматическом канале – разломе, выходящем из магматического очага, или в дайке; (б) – в горизонтальной интрузии или силле, выходящем из вертикального разлома – магматического канала

в твердом теле уровень напряжений горизонтального сжатия ниже чем в жидкой магме).

Приведена схема обжимающих напряжений  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{zz}$  соответственно для вертикальной и горизонтальной трещин, развивающихся из магматического очага с внутренним давлением  $P_m^0$  (рис. 4).

Давление магмы во фронте ее продвижения по разлому  $P_m^f$  подчиняется соотношению:

$$P_m^f \geq \delta_c + \sigma_{\Gamma\Gamma}, \quad \Gamma = x, z. \quad (1)$$

Здесь  $\delta_c$  – прочность пород на разрыв. Заметим, что в формуле (1) и далее правило знаков нормальных напряжений принято, как в горном деле (сжатие положительное).

Закон распределения давления магмы  $P_m$  в субвертикальных разрывах и трещинах является основополагающим элементом анализа возможности продвижения магмы к поверхности. В наиболее простой форме его можно принять в гидростатическом виде:

$$P_m = P_m^0 - hg\rho_m, \quad (2)$$

где  $h$  – вертикальная дистанция разлома от кровли магматического очага,  $g$  – ускорение силы тяжести

сти,  $\rho_m$  – плотность самой магмы,  $P_m^0$  – давление магмы в подкоровом очаге. Согласно формуле (2), если известно давление в магматическом очаге, то при движении вверх магмы ее давление в разломе на каждом новом уровне снижается на величину веса нижележащего столба магмы.

Это соотношение отвечает стационарной стадии процесса проникновения магмы по разлому, когда движение магмы либо уже отсутствует, либо имеет квази-постоянную скорость. Важно отметить, что для нестационарной стадии, когда идет продвижение магмы по разлому вверх, ее давление во фронте ниже гидростатического закона, представленного в формуле (2) [75].

В процессе продвижения магмы отклонение от равновесного состояния связано в первую очередь с ее вязкостью и, в некоторой степени, с динамикой процесса в случае быстрого движения фронта. Стационарная стадия возникнет только после выхода магмы из разлома на поверхность или при формировании внутрикорового магматического очага.

Также важным положением тектонофизического анализа является определение уровня давления  $P_m^0$  в мантийном магматическом очаге, расположенном под подошвой коры мощностью  $H_c$ .

На начальном этапе формирования магматического очага, когда аномально разогретая мантия –

диапир подошла к подошве коры, ее вязкость составляла  $10^{16}$ – $10^{17}$  Па·с. При такой высокой вязкости вещество только условно может восприниматься как жидкость. Это означает, что при достаточно большом времени ее нахождения в стационарном состоянии (у подошвы коры) в ней установится одинаковое во всех направлениях давление, равное весу вышележащих пород.

Но для того, чтобы вещество аномальной горячей мантии могло двигаться вверх по разлому, его вязкость должна понизиться на 10 и более порядков (до  $10^2$ – $10^7$  Па·с). Это происходит в подкоровом магматическом очаге за счет выдавливания в верхнюю часть магматической камеры расплава, содержание которого в аномально разогретой магме должно достигать 20–40%.

Нижний порог степени содержания расплава отвечает пропаданию  $S$  волн для лучей, проходящих через магматический очаг, а верхний – соответствует минимальному значению начала отделения расплава аномальной мантии [2, 55].

Для высокой степени выплавления магмы в очаге необходимо несколько миллионов лет. Достижение большей степени расплава и существенное уменьшение сроков выплавки происходит при увеличении процента содержания воды в магме, что практически автоматически происходит в условиях формирования магматического очага из коромантийной смеси. Таким образом, можно считать, что в магматическом очаге еще до начала его дифференциации на верхнюю – жидкую расплавленную часть и нижнюю – существенно более вязкую, устанавливается изотропное давление.

Будем считать, что в литосфере напряжения наибольшего сжатия субвертикальны и поэтому мантийный диапир, формирующий будущий магматический очаг, в процессе понижения вязкости магмы постепенно приобретает неизометричную форму, растекаясь вдоль подошвы коры ( $z = H_c$ ). В этом случае можно считать, что давление в нем близко к весу столба вышележащих пород, т.е. к литостатическому давлению на подошве коры  $p_{lt}(H_c)$ . При этом допустимы малые вариации давления:

$$P_m^o = p_{lt}(H_c) = H_c \rho_c g, \quad (3)$$

где  $\rho_c$  – средняя плотность пород коры,  $g$  – ускорение силы тяжести.

При растекании мантийного диапира вдоль подошвы коры в нем ускоряются процессы частичного плавления и, в некоторый момент времени начнет происходить дифференциация и формиро-

вание жидкой части магматического очага. Будем далее именно этот момент времени рассматривать как начало проникновения магмы в коровый разлом, ранее здесь существовавший.

Используя сформулированные три базисных положения, далее выполним тектонофизический анализ эволюции напряженного состояния коры в ходе проникновения магмы вверх по магмоподводящему субвертикальному разлому. Будем считать, что начальный магматический очаг представлял собой большое по площади уплощенное корово-мантийное тело, расположенное под подошвой коры на глубине  $H_c = 40$  км. Наши расчеты будут относиться к установившейся стадии процесса, когда скорость движения магмы постоянная.

Сразу оговорим, что мы не ставили задачу численного геомеханического расчета для 2D или 3D модели, отвечающих всем особенностям строения коры Норильского района. Рассматривалась принципиальная схема внутреннего строения коры, ортогональная простиранию Хантайско-Рыбнинского вала, и ее эволюция, отвечающая основным этапам развития исследуемого региона. Фактически речь идет о тектонофизических оценках условий формирования напряженного состояния коры в процессе ее магматизации. Сделана попытка выяснить, можно ли в рамках гипотезы об определяющей роли напряженного состояния объяснить возникновение внутрикоровых магматических очагов на глубине 10–20 км и их последующую активизацию, приводящую к формированию силлов хонолитового – ленточного типа в верхней части осадочного чехла.

Расчеты, представленные в настоящей работе, опирались на наши предварительные исследования эволюции напряженного состояния коры при ее магматизации по разломам в разных начальных условиях напряженного состояния: горизонтальное растяжение, горизонтальное сжатие [41, 42]. Они показали, что при режиме горизонтального растяжения, охватывающего всю кору, магма по разломам способна достичь поверхности с образованием ареальных или вулканических излияний.

В условиях горизонтального сжатия в верхней части коры (10–15 км) давления магмы в разломе не хватает для раздвигания его бортов по мере приближения к поверхности, что делает невозможным ее дальнейшее продвижение. При определенных условиях (соотношение давления магмы в подкоровом магматическом очаге и напряжений горизонтального сжатия) давления магмы в разломе в верхней точке ее подъема может быть доста-

точно для формирования крупных горизонтальных интрузий – внутрикорового магматического очага.

Повышение уровня горизонтального сжатия на достаточно больших площадях (первые сотни километров) вдоль магмоподводящих разломов приводит в случае геодинамического типа начального состояния в виде горизонтального растяжения к его смене на горизонтальный сдвиг с ориентацией наибольшего сжатия субортогонально разлому [41].

### ***Распределение напряжений в разрезах коры Норильского района до начала и на ранних этапах вулканизма***

Выполним теперь анализ эволюции магматических структур Норильского района, используя для этого выше сделанные представления об этапах формирования напряженного состояния коры региона (см. рис. 2).

Будем моделировать кору в виде 4-х слоев, три из которых отвечали структуре до начала магматизма (0–7 км – осадочный чехол; 7–27 и 27–40 км – консолидированная кора), четвертый слой соответствовал эффузивному слою в 4 км и отвечал завершающей стадии магматизма. Плотности слоев максимально приближены к усредненным данным исследуемого региона (фундамент 2.78–2.85 г/см<sup>3</sup>, осадочный чехол 2.60–2.75 г/см<sup>3</sup>).

Считалось, что уровень флюидного давления в коре увеличивается с глубиной и составляет 0.4–0.8 от литостатики, прочность внутреннего сцепления  $\tau_f = 3\text{--}10$  МПа, коэффициент внутреннего трения  $k_f = 0.6$ , плотность пород возрастает с глубиной и изменяется в диапазоне  $\rho_c = 2.60\text{--}2.85$  г/см<sup>3</sup>. Денудационная разгрузка отвечала около 50 МПа, что соответствует эрозионной мощности около 2.5–3.0 км.

Согласно [50], формирование магматического очага в основании коры происходило за счет накопления больших масс пикритового расплава (коромантийная смесь), плотность и свойства которых близки к породам в зоне раздела кора – мантия [59]. Это согласуется с данными ГСЗ, зафиксировавшими здесь коромантийную смесь со скоростями продольных волн 7.3–7.8 км/с [10, 12, 13, 37].

В нашей модели считалось, что плотность магмы вблизи подошвы коры  $\rho_m = 3.0$  г/см<sup>3</sup> (с учетом изменения плотности от температуры). Магма в разломе – колонне и в промежуточных очагах может эволюционировать до толеитов путем фракционирования оливина с образованием оливинового кумулята [2]. При задании изменения плотности магмы с глубиной учитывалось, что она находится

в расплавленном состоянии, давление с глубиной линейно возрастает и более тяжелые ее фракции частично не доходят до поверхности.

Данные для эффузивных комплексов пород от ивакинской до самоедской свит определяют увеличение средней плотности от 2.7 до 2.85 г/см<sup>3</sup> при вариациях до 2–5%. Поэтому вблизи поверхности полагалось, что плотность магмы  $\rho_m = 2.7$  г/см<sup>3</sup>. Изменения плотности связывается с гравитационной сепарацией и фракционной дифференциацией в колонне [19, 20], что приводит к нелинейному характеру изменения давления магмы вверх по разлому.

В нижней части коры Норильско-Хараелахского прогиба по материалам ГСЗ зафиксирована рифтовая подушка, что является следствием внедрения по ослабленным проницаемым зонам мантийного материала [10, 12, 13, 37, 59]. Рифтовая подушка может интерпретироваться как верхняя часть мантийного диапира, проникающего в кору палеорифта.

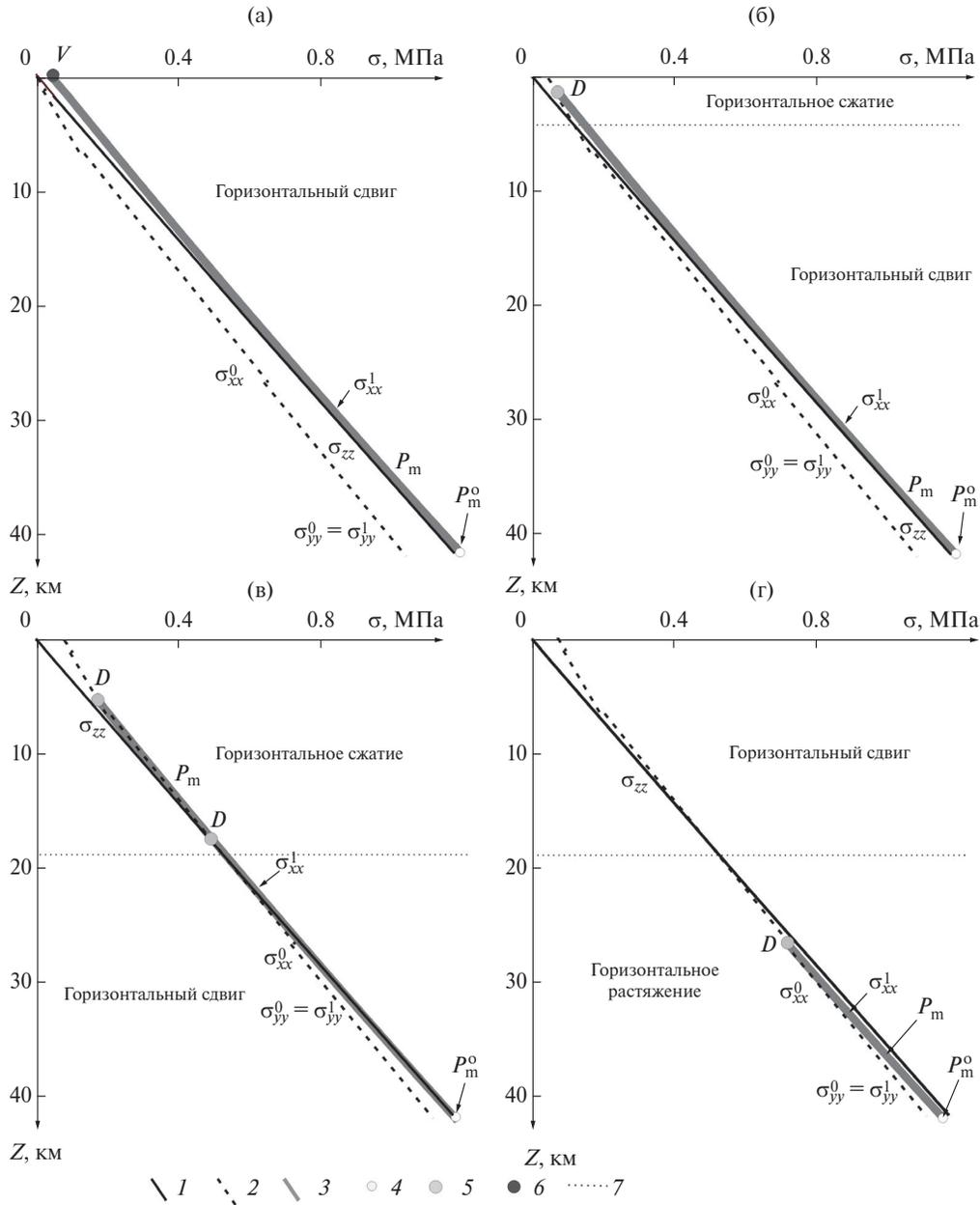
Полагаем, что для Норильско-Хараелахского прогиба, как и для других типичных рифтогенных структур, наблюдается сравнительно небольшое поднятие подошвы коры [12, 13, 51, 52] относительно восточного крыла Иманджинско-Летнинского разлома, т.е. Тунгуской синеклизы.

Результаты расчетов для участков коры Норильско-Хараелахского прогиба и Хантайско-Рыбинского вала (рис. 5) отвечали третьей стадии изменения напряженного состояния коры исследуемого региона, в которых с запад–северо-запада на восток–юго-восток возрастал уровень напряжений горизонтального сжатия, повышался рельеф и при этом считалось, что давлением магмы в мантийном очаге на всем его протяжении одинаковое (см. рис. 2, в). Соответственно в этих расчетах кора представлена трехслойной моделью (эффузивный осадочный слой отсутствовал).

Первые два расчета отвечали коре Норильско-Хараелахского прогиба с начальным напряженным состоянием для более дальней и близкой зонами коры Хантайско-Рыбинского вала соответственно (см. рис. 5, а, б).

Для коры Норильско-Хараелахского прогиба уровень давления магмы в очаге – повышенный. Это связано с большим значением давления в магматическом очаге относительно веса вышележащего столба пород.

Два других расчета соответствовали коре переходной и центральной зон Хантайско-Рыбинского вала соответственно с давлением магмы в подкоре



**Рис. 5.** Изменение напряжений в коре в процессе проникновения магмы по субвертикальному разлому.

(а)–(б) – Норильско-Хараелахский прогиб:

(а) – области с начальным напряженным состоянием растяжения всей коры данного прогиба,

(б) – области горизонтального сжатия для верхней части коры данного прогиба;

(в)–(г) – Хантайско-Рыбнинский вал:

(в) – области горизонтального сжатия при давлении магмы в подкоровом очаге, равном веса вышележащих пород,

(г) – области горизонтального сжатия при давлении магмы в подкоровом очаге, меньшим веса вышележащих пород.

На (а), (б) – давление магмы в мантийном магматическом очаге  $P_m^o > p_{lt}(H_c)$  на 15 МПа (1.5% от литостатики);

на (в) –  $P_m^o > p_{lt}(H_c)$ ,

на (г) –  $P_m^o > p_{lt}(H_c)$  на 15 МПа.

1 – вертикальные напряжения (литостатическое давление)  $\sigma_{zz} = p_{lt}$ , неизменяющиеся в ходе ранних этапов магматизации коры; 2 – горизонтальные напряжения  $\sigma_{xx}^0$ , нормальные к простиранию разлома, и горизонтальные напряжения  $\sigma_{yy}^0 = \sigma_{yy}^1$ , параллельные его простиранию; 3 – давление  $P_m$  в магматическом канале (магмопроводящем разломе) после активизации промежуточного магматического очага и горизонтальное напряжение  $\sigma_{xx}^1$ ; 4 – давление в промежуточном магматическом очаге; 5 – глубина формирования промежуточных магматических очагов начальной стадии магматизма (D); 6 – магматические излияния в виде невысоких вулканических построек (V); 7 – глубина смены геодинамического типа напряженного состояния

ровом очаге, равным весу вышележащих пород и с несколько меньшим давлением (см. рис. 5, в, г).

Считалось, что стадия эволюции напряженно-состояния соответствует началу проникновения магмы из подкорового очага вверх по разломам (см. рис. 5, в).

Давление в магматическом очаге — меньшее, чем литостатическое давление ( $p_{lit}$ ) в окружающих породах, что связывается с более высоким рельефом для центральной части Хантайско-Рыбнинского вала (см. рис. 5, г).

Верхние индексы для напряжений соответствуют стадиям (см. рис. 5):

<sup>0</sup> — до начала вулканизма в ранней перми;

<sup>1</sup> — после первой стадии корового магматизма (см. рис. 5, б, в, г) и вулканизма (см. рис. 5, а) в поздней перми.

Для коры Норильско-Хараелахского прогиба повышение в процессе продвижения магмы по разлому напряжений горизонтального сжатия, ортогонального простиранию разлома ( $\sigma_{xx}^1 > \sigma_{xx}^0$ ), приводит к тому, что в коре вокруг магмопроводящего разлома формируется режим горизонтального сдвига (для всей коры (см. рис. 5, а)) и большей части коры (см. рис. 5, б), т.к. напряжения горизонтального сжатия ( $\sigma_{yy}$ ), действующие в направлении простирания разлома, мало изменяют свою величину (в расчетах см. рис. 5  $\sigma_{yy}^0 \approx \sigma_{yy}^1 < \sigma_{xx}^1$ ) и поэтому промежуточное главное напряжение действует в вертикальном направлении ( $\sigma_{yy}^1 < \sigma_{zz} < \sigma_{xx}^1$ ).

Из приведенных прогнозов изменения напряженного состояния видно, что для коры Норильско-Хараелахского прогиба к западу от одноименного Норильско-Хараелахского разлома магма может изливаться на поверхность ареальным типом или с формированием вулканической постройки малой высотой до 1–1.5 км (рис. 5, а).

В случае закупорки вулканической постройки и при невозможности излияния магмы до поверхности, в верхней части коры могут формироваться горизонтальные интрузии [24].

При большем повышении уровня горизонтального сжатия, которое может иметь место в коре Норильско-Хараелахского прогиба ближе к Хантайско-Рыбнинскому валу, продвижение магмы до поверхности становится невозможным (см. рис. 5, б).

Здесь в верхней части осадочного чехла давление магмы в разломе сравнивается с напряжениями горизонтального сжатия.

В переходной зоне коры от Норильско-Хараелахского прогиба, расположенной к вос-

току от Норильско-Хараелахского разлома, на глубине от 5 до 17 км давление магмы очень близко к напряжениям горизонтального сжатия и при этом здесь оно выше литостатического давления пород (см. рис. 5, в).

Это означает, что в данном диапазоне глубин в коре также возможно формирование горизонтальных интрузий.

Отметим, что возможность формирования горизонтальных интрузий на глубинах 7–20 км согласуется с выводами работы [10, 11] об определяющей роли промежуточных магматических камер в средней коре в формировании медно-никелевых месторождений норильского типа с аномально высоким отношением сульфидной массы к силикатной в Норильском и Талнахском интрузивах.

Это подтверждают результаты 3D моделирования, выполненного в работе [43], по данным аэромагнитной съемки. Моделирование показало магнитные аномалии, отождествляемые с промежуточными очагами рудоносной магмы, которые могли быть расположены на глубинах до 12–15 км. Эти очаги образуют две субмеридиональных цепочки, отчетливо прослеживаемые по Хараелахскому и Имангдинско-Летнинскому разломам — главным магмоконтролирующим структурам Норильского рудного района.

В коре Хантайско-Рыбнинского вала давление магмы в разломе способно ее поднимать только до глубин средней коры (см. рис. 5, г).

При этом давление магмы остается ниже литостатического давления пород. Здесь магмоподводящий разлом закрывается и становится неспособным создать горизонтальные интрузии. На этой глубине возможно возникновение магматических структур типа лаколитов.

Для двух последних расчетов повышение напряжений горизонтального сжатия на участках проникновения магмы по разлому также происходит, но это не приводит к смене геодинамического режима (см. рис. 5, в, г). Исключением здесь является небольшой участок средней коры ниже точки D там, где утолщенная серая линия (давление магмы) расположена левее черной линии (литостатическое давление) (см. рис. 4). Здесь в интервале глубин 17–25 км возникает режим горизонтального сдвига.

Предлагаемую нами интерпретацию эволюции напряжений и транспорта магмы по разлому для Норильско-Хараелахского прогиба можно также применить и к коре Тунгусской синеклизы с той

разницей, что увеличивающийся с востока на запад уровень горизонтального сжатия в коре этой структуры имеет меньшую величину. Таким образом, в коре переходной зоны вместо состояния, показанного на рисунке 5 (в), будет формироваться состояние, близкое к состоянию, показанному на рисунке 5 (б).

Проведенное нами моделирование напряженного состояния коры исследуемого региона относится к ранней стадии вулканизма, когда на поверхности еще не возникла мощная эффузивная покровка.

***Изменение напряженного состояния коры зоны перехода Норильско-Хараелахского прогиба на завершающем этапе магматизма в триасовый период***

Проведем анализ возможных изменений напряженного состояния коры для Норильско-Хараелахского прогиба в области Норильского и Талнахского месторождений, где согласно нашим оценкам в начальной стадии магматизма происходила смена напряженного состояния (см. рис. 5, в).

На глубине 5–17 км давление магмы, превышающее литостатику, формирует горизонтальные интрузии, которые можно рассматривать как внутрикоровые магматические очаги.

В это же время с соседних к западу, востоку и, возможно, — к северу от Хантайско-Рыбнинского вала в геологических объектах происходило излияние вулканических лав на поверхность, т.к. здесь в коре по всей ее мощности существовал режим горизонтального растяжения (см. рис. 5, а). Результатом этого процесса стало изменение рельефа поверхности как в сопряженных с Хантайско-Рыбнинским валом областях, так и для самого вала (см. рис. 2, г).

Такое изменение рельефа прежде всего привело к появлению поверхностного вулканогенного слоя, в котором действует режим горизонтального растяжения, вызванный действием только массовых сил. В свою очередь, появление такого дополнительного слоя приводит к дополнительному вертикальному нагружению пород на глубине, которое в большей степени сказалось на увеличении литостатического давления (прямо пропорционально весу столба вновь возникших вулканогенных осадков).

Горизонтальные напряжения сжатия также увеличились, но рост горизонтального сжатия был меньшим. Диаграмма распределения напряжений в глубине верхней коры Хантайско-Рыбнинского

вала для трех вариантов давления магмы в промежуточном коровом очаге показана на рисунке 6.

Здесь дополнительный слой вулканогенных осадков имел мощность 3 км, что привело к увеличению на 81 МПа литостатического давления по всей глубине. В случае чисто упругого деформирования увеличение горизонтального сжатия могло составить 27 МПа, а учет влияния закритического поведения повышает горизонтальное сжатие до 50–60 МПа.

Индексы (верхние) для напряжений соответствуют стадиям (см. рис. 6):

<sup>0</sup> — ранней перми до начала пермско-триасового вулканизма (начальное напряженное состояние — см. рис. 5, в);

<sup>1</sup> — формирования промежуточного магматического очага (поздняя пермь—ранний триас);

<sup>2</sup> — после создания на поверхности эффузивной покровки мощностью 3 км;

<sup>3</sup> — после активизации промежуточного очага (конечное напряженное состояние).

Таким образом, в коре исследуемого региона происходило многократное изменение напряженного состояния по отношению к тому, которое здесь состоялось после возникновения вулканической деятельности в начале пермского периода (рис. 5, в).

Горизонтальные напряжения  $\sigma_{xx}$  показаны для трех этапов (см. рис. 6):

— начальный  $\sigma_{xx}^0$ ;

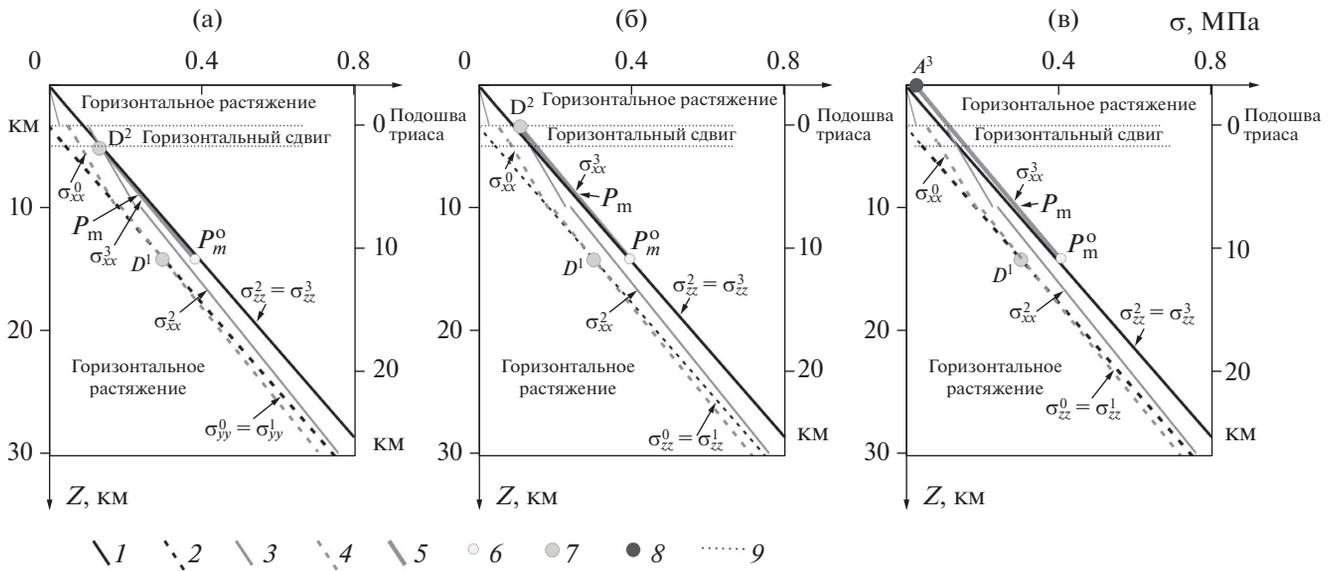
— в результате возникновения эффузивной покровки в 3 км  $\sigma_{xx}^2$ ;

— активизация промежуточного внутрикорового магматического очага  $\sigma_{xx}^3$ .

Напряжения, отвечающие начальной стадии магматизма, при которой возник промежуточный внутрикоровый магматический очаг ( $\sigma_{xx}^1$ ) и ниже уровня остановки фронта продвижения магмы по разлому, совпадают с давлением магмы в разломе (см. рис. 5, в).

Если давление магмы во внутрикоровом очаге ниже литостатического давления, то в этом случае магма продвигается по субвертикальному разлому, но только до глубины около 5 км, т.к. на этих глубинах горизонтальное сжатие  $\sigma_{xx}^2$  больше по величине давления магмы в колонне (см. рис. 6, а).

Поскольку давление магмы при этом ниже литостатики, то здесь не формируются горизонтальные интрузии. При равенстве давления магмы в очаге литостатическому давлению субвертикальный разлом становится проводящим до глубины около 3 км (подошва туфолавовой толщи триасового возраста) (см. рис. 6, б).



**Рис. 6.** Схемы изменения напряжений в верхней части коры переходной зоны Норильско-Хараелахского погиба в процессе проникновения магмы из внутрикорового очага по субвертикальному разлому при трех вариантах уровня магматического давления  $P_m^o$  в мантийном очаге.

(а) –  $P_m^o < P_{lit}$ ; (б) –  $P_m^o = P_{lit}$ ; (в) –  $P_m^o > P_{lit}$  ( $P_{lit}$  – литостатическое давление пород). Глубины до формирования эффузивной толщи триасовых пород на поверхности.

1–4 – напряжения: 1 – вертикальное (литостатическое давление)  $\sigma_{zz}^2 = \sigma_{zz}^3$ ; 2 – вертикальное  $\sigma_{zz}^0 = \sigma_{zz}^1$ ; 3 – горизонтальное  $\sigma_{xx}^2$ , нормальное к простиранию разлома и  $\sigma_{yy}^2 = \sigma_{yy}^3$ , параллельное простиранию разлома; 4 – горизонтальное и  $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{yy}^0 = \sigma_{yy}^1$ ;

5–6 – давление: 5 –  $P_m$  в магматическом канале (магмопроводящем разломе) после активизации промежуточного магматического очага и горизонтальное напряжение  $\sigma_{xx}^3$ ;

6 – в промежуточном магматическом очаге; 7 – глубина формирования промежуточных магматических очагов начальной стадии магматизма ( $D^1$ ) и после образования эффузивной покрывки  $D^2$ ; 8 – магматические излияния на поверхность ареального типа после активизации промежуточного магматического очага  $A^3$ ; 9 – глубина смены геодинамического типа напряженного состояния, возникшего после формирования эффузивной покрывки мощностью 3 км (до начала активизации внутрикорового магматического очага – напряжения с верхним индексом <sup>2</sup>)

На этой глубине вертикальное перемещение магмы становится невозможным, но возможно формирование горизонтальных интрузий.

Третий расчет отвечает более высокому давлению магмы в коровом очаге и приводит к излиянию магмы на поверхность (см. рис. 6, в).

Таким образом, мы считаем, что внутрикоровый магматический очаг после формирования поверхностного эффузивного комплекса более 2.5 км способен создать широкий спектр вариантов магматизма в осадочном чехле.

Важно также отметить, что здесь после формирования горизонтальной интрузии в породах древнее триасового возраста повышается уровень напряжений горизонтального сжатия, в направлении, ортогональном разлому (см. рис. 5, а, б).

Это повышение приводит к смене геодинамического режима напряженного состояния горизонтального растяжения на горизонтальный сдвиг, т.к. в новом состоянии промежуточное главное

напряжение действует в вертикальном направлении ( $\sigma_{yy}^2 < \sigma_{zz} < \sigma_{xx}^2$ ) (см. рис. 6, б, в).

В таком состоянии создание горизонтальных интрузий происходит не за счет вертикального расклинивания слоистой породы и формирования плоских, широких по площади силлов, а за счет горизонтального раздвигания породы внутри слоя пониженной прочности в направлении, ортогональном магмоподводящему разлому и действию напряжений наименьшего горизонтального сжатия ( $\sigma_{yy}^2$ ). Возникает возможность формирования карандашеподобных, лентоподобных силлов (хонолитов).

Созданные тектонофизические модельные схемы формирования внутрикоровых промежуточных магматических очагов в зоне перехода от Рыбинского вала к Норильско-Хараелахскому прогибу и Тунгусской синеклизе хорошо соответствуют выделяемым здесь мульдам проседания.

Можно полагать, что магматические очаги будущих мульд проседания располагались на глубинах 10–15 км. Соответственно, Норильско-Хараелахский разлом можно рассматривать как магмоподводящий разлом, обеспечивавший прохождение магмы до глубин средней коры. Дальнейшие излияния магмы на стадии вторичной активизации магматизма за счет излияний из внутрикоровых магматических очагов могло быть уже не связано с этим разломом, а осуществляться по локальным разрывам в верхнем осадочном слое земной коры.

В работе [43] показано, что магнитные аномалии Норильского района могут быть связаны с промежуточными очагами рудоносной магмы, которые на основании геофизических данных предполагаются на глубинах до 12–15 км. Мощность интрузивных тел может достигать 5 км [50]. Предполагаемые магматические очаги образуют две субмеридиональных цепочки вдоль трасс Норильско-Хараелахского прогиба и Имангдино-Летнинского разлома. В работах [10, 11, 43] мощные интрузивы, залегающие на большой глубине, рассматриваются как необходимое условие формирования медно-никелевых месторождений норильского типа.

Таким образом, тектонофизические оценки эволюции напряженного состояния коры Норильского района и интерпретация его влияния на изменение внутренней структуры верхней части коры в процессе магматизма пермского и триасового периодов согласуется с данными геофизических наблюдений.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования позволили проиллюстрировать хорошо известные представления о благоприятном режиме горизонтального растяжения земной коры для процессов эффузивного и интрузивного магматизма. Подтверждено, что в случае формирования вулканических очагов на поверхности и при трещинном – ареальном излиянии магмы в земной коре по всей ее мощности повышается уровень напряжения горизонтального сжатия в направлении, нормальном к разлому, что может в верхней части коры привести к смене режима напряженного состояния от горизонтального растяжения к горизонтальному сдвигу, в некоторых случаях – к сжатию.

Установлено, что если до начала магматизма существовал высокий уровень горизонтального сжатия в средней и верхней коре, то продвижение магмы по субвертикальным разломам непосред-

ственно до поверхности становится невозможным. При закрытии разлома для продвижения магмы вверх они могут (i) становиться магматически не проявляющимися, но могут (ii) формировать внутрикоровые очаги или горизонтальные интрузии. Здесь все зависит от соотношения между уровнем магматического давления в мантийном очаге и уровнем литостатического давления в окружающих промежуточный очаг толщах.

Для случая (i) таких разломов в коре также повышается уровень напряжения горизонтального сжатия, но при этом смены типа напряженного состояния не происходит. При формировании внутрикоровых магматических очагов (ii) в их окрестности происходит смена геодинамического типа напряженного состояния горизонтального растяжения на горизонтальный сдвиг.

В рамках расширения фундаментальных представлений на явление магматизма следует заключить, что этапы магматизма коры следует рассматривать как периоды повышения уровня напряжений горизонтального сжатия. В случае наличия в коре региона субпараллельных магмоподводящих разломов, как это имеет место при субдукции океанической литосферы под континентальную, в ней будет формироваться режим горизонтального сдвига или сжатия с ориентацией оси напряжения наибольшего сжатия, ортогональному простиранию границы столкновения литосферных плит. При площадном излиянии магмы на поверхность по множеству разноориентированных разломов и трещин (например, сибирские траппы) уровень напряжений горизонтального сжатия в разных направлениях должен быть близок к изотропному (режим горизонтального сжатия).

Поскольку для большинства внутриконтинентальных орогенов и орогенов зон активных континентальных окраин процессы магматизма присутствовали на этапах их формирования [40–42], можно считать, что процессы вулканизма и магматизации коры следует рассматривать, как один из факторов возникновения повышенного уровня напряжений горизонтального сжатия.

## ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследований можно сформулировать следующие основные положения тектонофизической модели процесса формирования рудоносных дифференцированных интрузий Норильского района.

1. Установлено, что главным фактором, определившим возможности формирования месторождений магматического генезиса в Норильском регионе, является неоднородность напряженного состояния, которая связана не столько структурными особенностями и с вещественным составом пород коры, сколько с рельефообразованием и экзогенными процессами. Именно эти процессы на момент пермского времени, т.е. еще до начала магматизма, сформировали глубинную и латеральную зональность напряженного состояния коры в окрестности Хантайско-Рыбнинского вала, которая затем эволюционировала в ходе вулканического процесса.

2. В исследуемом Норильском районе к началу пермского периода существовали два основных режима напряженного состояния коры в виде горизонтального растяжения и горизонтального сжатия. Режим напряженного состояния горизонтального сдвига также действовал в коре, но он был связан с локальными изменениями напряжений двух выше названных основных режимов, которые интенсифицировались в период магматизма. Латеральная и глубинная неоднородность напряженного состояния, выражающаяся в смене геодинамических режимов вкост Хантайско-Рыбнинского мегавала, Норильско-Хараелахского прогиба и Тунгусской синеклизы, предопределяет и разный режим формирования интрузивного 3D поля.

3. Продвижение магмы по субвертикальному разлому происходит только в условиях, когда ее давление выше уровня напряжений горизонтального сжатия. Поэтому наиболее благоприятным для формирования излияния лав из субвертикальных магмопроводящих разломов на поверхность или формирования горизонтальных интрузий в осадочном чехле является режим корового напряженного состояния в виде горизонтального растяжения.

4. В результате поднятия магмы по вертикальным разломам всегда происходит повышение уровня напряжений горизонтального сжатия, нормальных к разлому. При этом уровень сжимающих горизонтальных напряжений, действовавших параллельно таким разломам, повышается незначительно.

5. Когда давление магмы в мантийном очаге, расположенном у подошвы коры, близко или выше литостатического давления вышележащих пород, в коре возникает режим коагматического горизонтального сдвига (магмоподводящие разломы субпараллельны) или сжатия (магмоподводя-

щие разломы субортогональны). Эти изменения напряженного состояния сопровождаются формированием вблизи магмоподводящих разломов разрывов и трещин соответственно сдвигового или взбросового типов.

6. Показано, что для консолидированной коры, в средней части которой существует режим напряженного состояния горизонтального сжатия, магмоподводящие субвертикальные разломы не могут поднять магму на поверхность. На определенных глубинах кристаллической коры уровень напряжений горизонтального сжатия оказывается выше уровня давления магмы в разломе. Таким образом, дальнейшее продвижение магмы по субвертикальному разлому невозможно, здесь происходит блокирование разлома.

7. Установлено, что для напряженного состояния западной части Норильско-Хараелахской впадины и для восточной части Тунгусской синеклизы режим напряженного состояния горизонтального растяжения коры создал возможность подъема магмы по субвертикальным разломам до поверхности.

8. Напряженное состояние горизонтального сжатия, действовавшее в коре сопряженных с Хантайско-Рыбнинским валом областях Норильско-Хараелахского прогиба и в западном сегменте Тунгусской синеклизы, приводило к блокированию поднятия магмы по разлому в средней коре. В связи с чем, на данных глубинах могли образовываться крупные субгоризонтальные интрузии (режим горизонтального сжатия), которые следует рассматривать как промежуточные внутрикоровые магматические очаги.

9. Для коры центральной части Хантайско-Рыбнинского вала, где до глубин средней коры был режим горизонтального сжатия, блокирование разлома происходило в нижней коре в условиях напряженного состояния горизонтального растяжения, при котором не могли образовываться горизонтальные интрузии.

10. Установлено, что в условиях напряженного состояния коры Норильского региона вблизи Норильско-Хараелахского, Микчангдинского и Имангдино-Летнинского магмоподводящих разломов возникновение внутрикоровых промежуточных магматических камер не является завершающим этапом процесса. Возможность выдавливания магмы в осадочный чехол обусловлена изменениями напряженного состояния, которые постепенно (1–2 млн лет) происходят в коре за счет появления дополнительной вертикальной нагрузки из-за

поверхностных излияний лав и формирования эффузивной толщи мощностью 2–4 км.

11. Эти изменения напряжений приводят к тому, что равновесное состояние на вертикальных трещинах сменится неравновесным, т.к. давление магмы в промежуточном очаге становится выше уровня напряжений горизонтального сжатия. Магма снова начинает подниматься по разломам и вертикальным трещинам. Важно отметить, что в этот раз движение магмы по разломам и трещинам имеет не такой быстрый и импульсный характер, как в начальный период магматизма. Движение магмы развивается постепенно по мере увеличения мощности эффузивных покровов.

12. Характер напряженного состояния коры вблизи Норильско-Хараелахского прогиба, Микчангдинского и Имангдино-Летнинского разломов приводит к тому, что в осадочном чехле на глубинах 2–6 км может происходить повторное блокирование магноподводящих разломов и вертикальных трещин, т.к. давление магмы сравнивается с уровнем напряжений горизонтального сжатия, нормального к разлому. Малые вариации давления магмы во внутрикоровом очаге приводят к формированию горизонтальных интрузий или к излиянию лавы на поверхность.

13. Напряженное состояние коагматического горизонтального сдвига, возникающее в малопрочных породах осадочного чехла на стадии создания горизонтальных интрузий, приводит к формированию хонолитообразных интрузивных структур и их возникновение играет контролируемую роль в финальной дифференциации интрузий и формировании месторождений.

**Благодарности.** Авторы признательны рецензенту А.С. Якубчуку (ГИН РАН, г. Москва, Россия) и анонимному рецензенту за полезные комментарии а также редактору М.Н. Шуплецовой (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альмухамедов А.И., Медведев А.Я. Геохимия серы в процессах эволюции основных магм. — М.: Наука, 1982. 146 с.
2. Андерсон Д.Л. Горячие точки, базальты и эволюция мантии. — В кн.: *Современные проблемы геодинамики*. М.: Мир, 1984. С. 197–217.
3. *Геологическая карта Норильского региона*. — М-б 1:200 000. — Под ред. М.Л. Шермана — СПб.: ВСЕГЕИ, 1991. 4 л.
4. *Годлевский М.Н.* Условия зарождения и кристаллизации рудоносных магм, формирующих медно-никелевые месторождения. — Т.1. — *Основные параметры процессов эндогенного рудообразования*. — Под ред. В.А. Кузнецова — Новосибирск: Наука, 1979. С. 109–118.
5. *Годлевский М.Н., Лихачев А.П.* Экспериментальные и физико-химические данные о формировании медно-никелевых месторождений. — В кн.: *Проблемы петрологии в связи с сульфидным медно-никелевым рудообразованием*. М.: Наука, 1981. С. 138–147.
6. *Гольдберг И.С.* Проблема источников металлов в месторождениях и ее решение на примерах формирования Cu–Ni месторождений России, Канады и Австралии в единых геохимических системах от региональных до локальных рангов. — В сб.: *Проблема минералогии, экономической геологии и минеральной геологии*. — Под. Ред. В.И. Старостина — М.: Макс-Пресс, 2021. С. 11–46.
7. *Гудман Р.* Механика скальных пород. — М.: Стройиздат, 1987. 232 с.
8. *Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М.* Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 9. С. 1159–1187.
9. *Дюжиков О.А., Дистлер В.В., Кавардин Г.И., Голубков В.С., Служеникян С.Ф., Лурье А.М.* Геологическая позиция, глубинное строение и рудомагматические системы Норильского района. — В кн.: *Глубинные условия эндогенного рудообразования*. — Под ред. В.И. Казанского — М.: Наука. 1986. 204 с.
10. *Дюжиков О.А., Дистлер В.В., Струнин Б.М., Мкртычян А.К., Шерман М.Л., Служеникин С.Ф., Лурье А.М.* Геология и рудоносность Норильского района. — Под ред. В.И. Казанского — М.: Наука. 1988. 279 с.
11. *Дюжиков О.А., Золотухин В.В., Кавардин Г.И.* Мезозойская металлогения Таймыро-Норильского района. — В кн.: *Закономерности размещения полезных ископаемых*. — Т.ХV. — *Металлогения Сибири*. — М.: Наука. 1988. С. 203–214.
12. *Егоркин А.В., Зюганов С.К., Чернышев Н.М.* Верхняя мантия Сибири. — Мат-лы 27-й МГК “Геофизика” (Докл. советских геологов). — М.: Наука, 1984. Т.8. С. 27–42.
13. *Егоркин А.В., Зюганов С.К., Павленкова Н.А., Чернышев Н.М.* Результаты исследования структуры литосферы на профилях в Сибири // *Геология и геофизика*. 1988. № 5. С.120–128.
14. *Журавлев Е.Г.* Тектоника фундамента Западно-Сибирской плиты // *Геотектоника*. 1986. №3. С.107–115.
15. *Золотухин В. В.* Обобщенная модель сульфидного медно-никелевого рудообразования как процесс сульфуризации. — В кн.: *Рудообразование и генети-*

- ческие модели эндогенных рудных формаций. — Под ред. А.А. Оболенского — Новосибирск: Наука. 1988. С. 172–181
16. Золотухин В.В., Лагута О.Н. О фракционировании магнезиальных базитовых расплавов и многообразии траппов на Сибирской платформе // Докл. АН СССР. 1985. Т. 280. № 4. С. 967–972.
  17. Золотухин В.В. Проблема генезиса сульфидного медно-никелевого оруденения в базит-гипербазитовых комплексах. — В кн.: *Генезис оруденения в базитах и гипербазитах*. — Свердловск: Политех, 1979. С. 48–57.
  18. Золотухин В.В., Альмухамедов А.И. Фракционирование и щелочность в эволюции исходных магм платформенных базитов (на примере северо-запада Сибирской платформы) // Геология и геофизика. 1990. № 10. С. 15–21.
  19. Золотухин В.В., Васильев Ю.Р. Проблемы платформенного магматизма. — Ст.1. — Глубинность магматических очагов в верхней мантии и ее роль в разнообразии проявлений магмы // Геология и геофизика. 1975. № 2. С. 3–10.
  20. Золотухин В.В., Васильев Ю.Р. Проблемы платформенного магматизма. — Ст.2. — Дифференциация как причина многообразия магм // Геология и геофизика. 1976. № 4. С. 58–67.
  21. Золотухин В.В., Рябов В.В., Васильев Ю.Р., Шатков В.А. Петрология Талнахской рудоносной дифференцированной трапповой интрузии. — Под ред. В.С. Соболева — Новосибирск: Наука, 1975. 434 с.
  22. Коровяков И.А., Нелюбин А.Е., Райкова З.А., Хортова Л.К. Происхождение норильских трапповых интрузий, несущих сульфидные медно-никелевые руды. — М.: Госгеолтехиздат, 1963. 101 с.
  23. Криволицкая Н. А., Плечова А. А., Костицын Ю. А., Беляцкий Б. В., Рощина И. А., Сви́рская Н.М., Кононкова Н. Н. Геохимические аспекты ассимиляции базальтовыми расплавами вмещающих пород при образовании норильских медно-никелевых руд // Петрология. 2014. Т. 22. № 2. С. 147–170.
  24. Криволицкая Н.А. Эволюция траппового магматизма и Pt-Cu-Ni рудообразование в Норильском районе. — Под ред. А.В. Соболева — М.: КМК, 2013. 306 с.
  25. Куно Г. Платобазальты. — В кн.: *Земная кора и верхняя мантия*. — М.: Мир, 1972. (англ. перевод) 140 с.
  26. Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. — М.: Эслан, 2006. 496 с.
  27. Лихачев А.П. Возможность самообогащения рудным веществом и тяжёлым изотопом серы ( $^{34}\text{S}$ ) мантийных магм, формирующих  $\text{P}^{\wedge}\text{M}$  месторождения и перспективное место для локализации руд в Норильском районе // Отечественная геология. 2019. № 3. С. 32–49.
  28. Лихачев А.П. Опоискованность Норильского района и возможности открытия в нём новых Pt-Cu-Ni месторождений // Отечественная геология. 2020. № 2. С. 3–16.
  29. Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения: механизмы накопления, новые источники и методы получения рудных веществ // Руды и металлы. 2002. № 5. С. 9–22.
  30. Лихачев А.П. Специфические особенности норильских рудоносных интрузий, их природа и определяющее значение в открытии Pt-Cu-Ni месторождений // Отечественная геология. 2019. № 5. С. 36–52. Doi: 10.24411/0869-7175-2019-10037
  31. Люлько В. А. и др. Опорная легенда геологической карты — М-6 1:50 000. — Серия Норильская. — Норильск: НКГРЭ, 1993.
  32. Малич Н. С. Тектоническое развитие чехлы Сибирской платформы. — М.: Недра, 1975. 216 с.
  33. Митрофанов Ф.П., Баянова Т.Б., Корчагин А.У., Грошев Н.Ю., Малич К.Н., Жиров Д.В., Митрофанов А.Ф. Восточно-Скандинавская и Норильская плюмовые базитовые обширные изверженные провинции pt/pd руд: геологическое и металлогеническое сопоставление // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. № 5. С. 357–373.
  34. Олейников Б.В. Геохимия и рудогенез платформенных базитов. — Новосибирск: Наука, 1979. 263 с.
  35. Радько В. А. Модель динамической дифференциации интрузивных траппов северо-запада Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1991. № 11. С. 19–27.
  36. Радько В. А. Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района. — СПб.: ВСЕГЕИ. 2016. 226 с.
  37. Рамберг И., Морган П. Физическая характеристика и направление эволюции континентальных рифтов. — М.: Наука, 1984. С. 78–109.
  38. Ребецкий Ю.Л. Механизм генерации остаточных напряжений и больших горизонтальных сжимающих напряжений в земной коре внутриплитовых орогенов. — В кн.: *Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН*. — М.:ИФЗ РАН, 2008. С. 431–466.
  39. Ребецкий Ю.Л. Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных движений // Физическая мезомеханика. 2008. Т 11. № 1. С. 66–73.
  40. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Козырев А.А. О возможном механизме генерации избыточного горизонтального сжатия рудных узлов Кольского полуострова (Хибинь, Ловозеро, Ковдор) // Геол. рудных месторождений. 2017. Т 59. № 4. С. 263–280.
  41. Ребецкий Ю.Л. О механизмах генерации избыточного горизонтального сжатия в континентальной коре // Физика Земли. 2023. № 3. С. 63–77.
  42. Ребецкий Ю.Л., Стефанов Ю.П. О механизме взаимодействия сильных землетрясений и вулканизма в зонах субдукции // Вестн. КРАУНЦ. 2022. Т. 56. № 4. С. 41–58. Doi:10.31431/1816-5524-2022-4-56-41-58
  43. Ремпель Г.Г., Паршуков Н.П., Вайвод Е.А. Объемное моделирование туфогенно-эффузивной толщи Норильского района по данным аэромагнитной съемки и прогноз медно-никелевого оруденения // Геология и геофизика. 1990. № 10. С. 87–98.

44. Рудакова А.В. Особенности строения и состава трапповой формации обрамления Хантайско-Рыбинского вала (Норильский район). – Автореф. дис. ... к.г.-м.н. – М.: МГУ, 2012. 24 с.
45. Рябов В.В., Шевко А.Я., Гора М.П. Магматические образования Норильского района. – Т.1. – Петрология траппов. – Новосибирск: Нонпарель, 2001. 408 с.
46. Рябов В.В., Симонов О.Н., Снисар С.Г., Боровиков А.А. Источник серы сульфидных месторождений в траппах Сибирской платформы по изотопным данным // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 8. С. 1176–119.
47. Соболев В.С. Петрология траппов Сибирской платформы. – Л.: Главсевморпуть 1936. 222 с.
48. Соболев В.С. Петрология траппов: Избранные труды. – Новосибирск: Наука, 1986. 209 с.
49. Струнин Б.М. Курейско-Горбиачинская вулканоплутоническая структура // Трапповый магматизм Сибирской платформы в связи с тектоникой и поисками полезных ископаемых. – Красноярск: Книжн. изд-во, 1983. С.68–69.
50. Струнин Б.М., Дюжиков О.А., Бармина О.А., Комаров В.В. Геологическая карта Норильского рудного района масштаба 1:200 000. – Объяснительная записка. – М.: Теоинформмарк, 1994. 118 с.
51. Сурков В.С., Жеро О.Г., Смирнов Л.В. Западно-Сибирская плита. – В кн.: *Разломы и горизонтальные движения платформенных областей СССР*. – М.: Наука, 1977. С.133–141.
52. Сурков В.С., Смирнов Л.В., Жеро О.Г. Эволюция триасовой рифтовой системы Западной Сибири. – В сб.: *Тектонические процессы*. – Докл. сов. геологов на XXVIII сессии Междунар. геол. конгресса, Вашингтон, 1989. – М.: Наука, 1989. С. 164–172.
53. Шерман М.Л., Фейзин Е.Б. и др. Отчет о проведении глубинных сейсмологических исследований в Норильском горно-рудном районе за 1976 г. – М.–Л.: Севморгео, Красноярское територ. геол. упр., 1977.
54. Arndt N.T. Insights into the geological setting and origin of Ni-Cu-PGE sulfide deposits of the Noril'sk-Talnakh region, Siberia // *Reviews in Economic Geology*. 2011. Vol. 17. P. 199–215.
55. Arndt N.T. Ultrabasic magmas and high-degree melting of the mantle // *Contrib. Miner. Petrol.* 1977, Vol. 64. No. 2. P. 205–221.
56. Arndt N.T., Czamanske G.K., Walker R.J., Chauvel C., Fedorenko V.A. Geochemistry and origin of the intrusive hosts of the Noril'sk-Talnakh Cu–Ni-PGE sulfide deposits // *Rec. Econom. Geol.* 2003. Vol. 98. P. 495–515.
57. Burgess S.D., Bowring S.A. High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction // *Sci. Adv.* 2015. Vol. 1. No 7. Art. E1500470. Doi: 10.1126/sciadv.1500470
58. Campbell I.H. Large igneous provinces and the mantle plume hypothesis // *Elements*. 2005. Vol. 1. P. 265–269.
59. Cox K.G. A model for the flood basalts vulcanism // *J. Petrol.* 1980. Vol. 21, No. 4. P. 629–650.
60. Czamanske G.K., Gurevich A.B., Fedorenko V., Simonov O. Demise of the Siberian plume: paleogeographic and paleotectonic reconstruction from the prevolcanic and volcanic records, North-Central Siberia // *Int. Geol. Rev.* 1998. Vol. 40. P. 95–115.
61. Duran C.J., Barnes S.-J., Plese P., Prasek M.K., Zientek M.L., Page P. Fractional crystallization-induced variations in sulphides from the Noril'sk–Talnakh mining district (Polar Siberia, Russia) // *Ore Geol. Rev.* 2017. Vol. 90. P. 326–351.
62. Elkins-Tanton L.T. Continental magmatism caused by lithospheric delamination. – In: *Plates, Plumes and Paradigms*. – (Princeton, Geol. Soc. Am. Spec. Pap. No.388. 2005), P. 449–462.
63. Gudmundsson A. Deflection of dykes into sills at discontinuities and magma-chamber formation // *Tectonophysics*. 2011. Vol. 500. P. 50–64.
64. Gudmundsson A. Emplacement and arrest of sheets and dykes in central volcanoes // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2002. Vol. 116. P. 279–298.
65. Gudmundsson A. How local stresses control magma-chamber ruptures, dyke injections, and eruptions in composite volcanoes // *Earth-Sci. Rev.* 2006. Vol. 79. P. 1–31.
66. Ivanov A.V. Evaluation of different models for the origin of the Siberian Traps. – In: *Plates, Plumes and Planetary Processes*. – Ed.by G.R. Foulger, D.M. Jurdy – (Geol. Soc. Am. Spec. Pap. No.430. 2007), P. 669–691.
67. Kamo S.L., Czamanske G.K., Amelin Yu., Fedorenko V.A., Davis D.W., Trofimov V.R. Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian–Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. Vol. 214. P. 75–91.
68. Kavanagh J.L., Menand T., Sparks R.S.J. An experimental investigation of sill formation and propagation in layered elastic media // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2006. Vol. 245. P. 799–813.
69. King S.D., Anderson D.L. Edge-driven convection // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1998. Vol. 160. P. 289–296. Doi: 10.1016/S0012-821X(98)00089-2
70. Malitch K.N., Belousova E.A., Griffin W.L., Martin L., Badanina I.Yu., Sluzhenikin S.F. Oxygen-hafnium-neodymium isotope constraints on the origin of the Talnakh ultramafic-mafic intrusion (Noril'sk Province, Russia) // *Economic Geol.* 2020. Vol. 115. No. 6. P. 1195–1212.
71. Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision // *Science*. 1975. Vol. 189. P. 419–426.
72. Naldrett A.J. A model for the Ni-Cu-PGE ores of the Noril'sk region and its application to other areas of flood basalts // *Economic Geol.* 1992. Vol. 87. P. 1945–1962.
73. Pollard D.D., Muller O.H., Dockstader D.R. The form and growth of fingered sheet intrusions // *GSA Bull.* 1975. Vol. 86. No 3. P. 351.
74. Rivalta E., Taisne B., Bungler A.P., Katz R.F. A review of mechanical models of dike propagation: Schools of thought, results and future directions // *Tectonophysics*. 2015. Vol. 638. P. 1–42.
75. Rubin A.M. Propagation of magma-filled cracks // *Ann. Rev. Earth Planet.* 1995. Vol. 23. P. 287–336.
76. Soboлев S.V., Soboлев A.V., Kuzmin D.V., Krivolutskaya N.A., Petrunin A.G., Arndt N.T., Radko V.A., Vasiliev Y.R. Linking

- mantle plumes, large igneous provinces, and environmental catastrophes // *Nature*. 2011. Vol. 477 (7364). P. 312–326. Doi: 10.1038/nature10385
77. Voight B., St Pierre B.H.P. Stress history and rock stress. — In: *Rock Mechanics*. — Proc. 3rd Congr. Int. Soc. (Denver, USA, 1974. Vol. 2), P. 580–582.
78. Yakubchuk A., Nikishin A. Noril'sk–Talnakh Cu–Ni–PGE deposits: A revised tectonic model // *Mineralium Deposita*. 2004. Vol. 39. P. 125–142. Doi: 10.1007/s00126-003-0373-0
79. *Space image*, [http://www.mmtk.ginras.ru/pdf/strunin\\_etal1994\\_norilsk\\_map.pdf](http://www.mmtk.ginras.ru/pdf/strunin_etal1994_norilsk_map.pdf) (Accessed July, 2023).

## Magmatism and Tectonophysical Characteristics of Formation of Ore-Bearing Intrusions in Norilsk Region (Eastern Siberia, Russia)

Yu. L. Rebetsky<sup>a, \*</sup>, V. N. Voitenko<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, bld. 10, str. B. Gruzinskaya, 123995 Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Norilsk Nickel Technical Services LLC, bld. 11, Grazhdansky Ave., 195220 St. Petersburg, Russia*

\*e-mail: reb@ifz.ru

In our research features of the field of deep intrusions and tectonics of the Norilsk region are studied. It is shown that the formation of copper-nickel deposits in the study area in the Early Triassic period is associated with the evolution of the stress field in the crust over 50–100 Ma. It is established that the features of the formation of the intrusive field at the initial stage are associated with the heterogeneity of the stress state that arose before the onset of magmatism in the Early Permian period in the crust of the Khantai-Rybninsky swell (uplift) and adjacent structures. The emergence of this heterogeneity, which had an inherited long-term nature, is due to the formation of uplifts in the region and the processes of denudation of these uplifts on the surface (amplitudes of 1.5–2.5 km). Since the processes of surface denudation lead to the release of rocks that have experienced a supercritical flow at great depths, in the upper layer and, partially, in the middle layer of the crystalline crust of the Khantai-Rybninsky swell and adjacent territories there were prerequisites for the emergence of a stress state of horizontal compression. In the lower layer of the crust of the Khantai-Rybninsky swell, as well as in the crust of the Norilsk-Kharaelakh trough and the Tunguska syncline, the horizontal extension regime was preserved. This difference in the stress state of extension and compression of the crust determined the features of the spatial heterogeneity of the development of volcanism and intracrustal magmatism of the Norilsk-Kharaelakh trough and the Tunguska syncline.

*Keywords:* tectonophysics, magmatism, stress regime, horizontal compression, magma pressure, magma-conducting faults, magmatic intrusions, Norilsk-Kharaelakh trough, Khantay-Rybninsky swell, Tunguska syncline