

УДК 551.24

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ДАЙКИ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ФУНДАМЕНТЕ: ЭКРАНИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТ КОНТАКТА ФУНДАМЕНТ-ЧЕХОЛ

А. Л. Кулаковский

Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

Рассмотрены вопросы, связанные с образованием пластовых, изначально горизонтально залегающих интрузий основного, ультраосновного и щелочного состава в зоне контакта кристаллического фундамента и осадочных отложений чехла. Определены основные закономерности формирования пластовых интрузий, а также вмещающих их субгоризонтальных зон дробления и/или брекчирования *in situ* в гранитоидах и метаморфитах фундамента в разных регионах, в различных геодинамических обстановках в интервале палеопротерозой-палеоген. Сделан вывод о предполагаемой связи возникновения таких зон дробления и/или брекчирования с волновым процессом: отражением волн упругой деформации от поверхности раздела двух контрастных по физико-механическим свойствам сред (фундамент – чехол) с появлением в фундаменте стоячих волн, предопределяющих локализацию зон дробления *in situ* при сбросе напряжений (тектоно-кессонный эффект).

Ключевые слова: система «фундамент – чехол»; пластовые интрузии; горизонтальные дайки; зоны дробления и/или брекчирования *in situ*; тектоно-кессонный эффект; стоячие волны.

A. L. Kulakovskiy. HORIZONTAL DIKES IN A CRYSTALLINE BASEMENT: SHIELDING EFFECT OF THE BASEMENT-COVER CONTACT

Issues related to the formation of sheetlike, initially horizontally bedded intrusions of basic, ultrabasic and alkaline composition in the contact zone of the crystalline basement and the sedimentary cover are considered. The main patterns in the formation of the sheets, as well as their host subhorizontal *in situ* crushing and/or brecciation zones in basement granitoids and metamorphites were identified for different regions and different geodynamic settings in the Paleoproterozoic-Paleogene interval. A connection was assumed to exist between the appearance of such crushing and/or brecciation zones and the wave process: the reflection of elastic deformation waves from the interface of two media contrasting in physical and mechanical properties (basement-cover) giving rise to standing waves in the basement, which predetermine the localization of *in situ* crushing zones during stress relief (tectonic caisson effect).

Keywords: basement – cover system; sheetlike intrusions; horizontal dikes; *in situ* crushing and/or brecciation zones; tectonic caisson effect; standing waves.

Введение

Одной из особенностей зоны контакта кристаллического фундамента и чехла является формирование в этой зоне пластовых, изначально возникающих как субгоризонтальных, параллельных контакту интрузий основного/ультраосновного или, реже, щелочного состава, суммарный объем которых может иногда достигать колоссальных размеров. Такие интрузии формируются как в низах чехольного комплекса, так и в кристаллическом фундаменте, а также и непосредственно вдоль поверхности контакта чехла и фундамента.

В литературе для таких интрузий, составляющих единый генетический комплекс, используются различные термины. В породах чехла это силлы. Тела, приуроченные строго к поверхности контакта фундамент-чехол, могут быть отнесены к межформационным интрузиям, хотя чаще их также именуют силлами. Сложнее подобрать адекватный термин для исходно субгоризонтально залегающих интрузий в кристаллическом фундаменте. Можно встретить применительно к ним термины «horizontal dikes» (горизонтальные дайки), «sheets» или «sheetlike» intrusions (пластины или пластовые интрузии), «tabular» или «blade-shaped» intrusions (листообразные интрузии), а иногда и «силлы» или «силлоподобные тела». Далее в тексте для подобных интрузий в кристаллическом фундаменте используются наиболее обычные в англоязычной литературе термины – «горизонтальные дайки» или «пластины» (пластовые интрузии).

Основные закономерности строения и истории становления подобных комплексов пластовых интрузий в зонах контакта фундамент-чехол можно понять, анализируя данные по наиболее изученным из таких объектов. При этом особый интерес представляет проблема деформационной обстановки формирования этого комплекса пластовых интрузий. Строго говоря, данная проблема, как и проблема становления вообще любой интрузии, предполагает рассмотрение двух в общем случае независимых механизмов: а) механизма возникновения того «объема», который впоследствии будет заполнен магмой (известная «проблема пространства», необходимого для образования интрузивного тела) и б) механизма становления (внедрения) самой интрузии.

Для рассматриваемого комплекса пластовых интрузий важно отметить, что деформационная обстановка их формирования принципиально отличается для силлов в породах чехла (а также силлов по контакту фундамента

и чехла), с одной стороны, и пластовых интрузий в фундаменте, с другой. В первом случае к моменту внедрения магмы уже существовала плоскостная анизотропия (по вертикали) среды, во втором (пластины в породах кристаллического фундамента) подобная анизотропия отсутствовала. Поэтому для силлов в породах чехла (и по поверхности структурного несогласия фундамент-чехол) вопрос о возникновении необходимого для интрузий «объема», т. е. «проблема пространства», практически не стоит: оно (возникновение) предопределено существованием субгоризонтальных поверхностей. А вот для пластовых интрузий в массивных гранитоидах (либо сложноскладчатых метаморфитах) фундамента механизм возникновения субгоризонтальных зон, вмещающих эти интрузии, требует особого рассмотрения.

Горизонтальные дайки (обзор)

Северо-запад Кольского полуострова (район р. Печенга). На северо-западе Кольского п-ова на глубокометаморфизованных породах архея со структурным несогласием залегают слабо- или умереннометаморфизованные терригенные и вулканогенные породы палеопротерозойского (2,3–1,9 млрд лет) печенгского комплекса, выполняющего рифтогенную Печенгскую впадину. На хорошо обнаженной территории к северу от Печенгских тундр и до побережья Баренцева моря широко распространены рои разновозрастных даек преимущественно основного-ультраосновного состава. Только для дорифейского времени здесь выделено [Морозов и др., 2017; Терехов и др., 2019] шесть генераций даек различной ориентировки, отражающих закономерную эволюцию архейско-палеопротерозойских геодинамических обстановок. Дайки одной из генераций (пикрит-долериты β_4 , по: [Морозов и др., 2017]) резко отличаются от всех прочих своим пологим залеганием, фактически это «субгоризонтальные дайки» (пластовые интрузии), секущие субвертикальную расслоенность метаморфитов архейского фундамента под углом, близким к прямому (рис. 1). Эти горизонтальные дайки («прибрежный комплекс» силлоподобных пологозалегающих тел пикродолеритов, по: [Морозов и др., 2017; Терехов и др., 2019]) обычно дифференцированы по составу: внизу – пикриты и коматииты, сверху – оливинсодержащие долериты.

Детальные структурные исследования показали [Морозов и др., 2017], что эти интрузии пикрит-долеритов образуют многоярусную си-

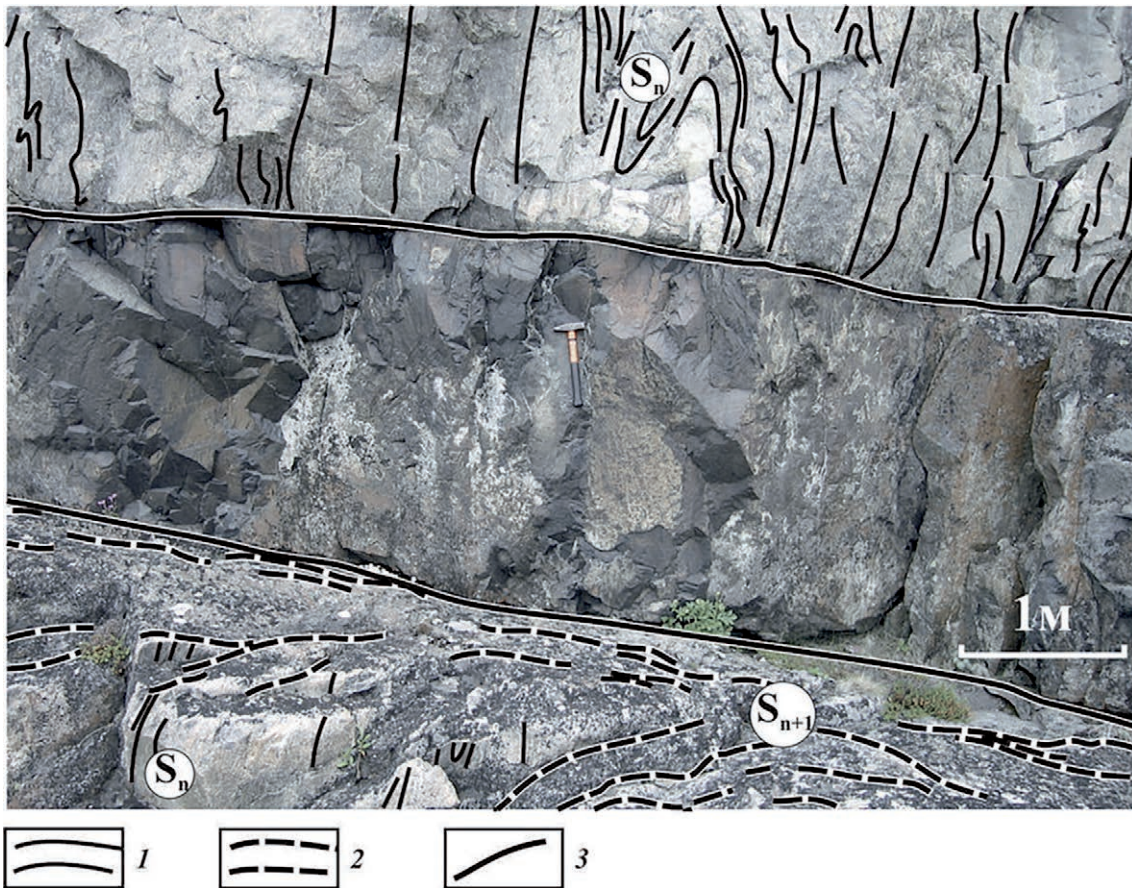


Рис. 1. Субгоризонтальная пластовая интрузия («горизонтальная дайка») пикрит-долеритов в архейских гранито-гнейсах северного обрамления Печенгской структуры (вертикальная стенка, вид на юг):

1 – субвертикальная полосчатость гранито-гнейсов (S_n), 2 – наложенная расслоенность сдвигового течения (S_{n+1}) у нижнего контакта интрузии, 3 – контакты интрузии

Fig. 1. Subhorizontal sheet (“horizontal dike”) of picrite-dolerites in the Archean granite-gneisses of the northern framing of the Pechenga structure (vertical wall, view to the south):

1 – subvertical foliation of granite-gneisses (S_n), 2 – superimposed foliation of the shear current (S_{n+1}) at the bottom contact of the intrusion, 3 – contacts of the intrusion

стему пластин, полого ($10\text{--}35^\circ$) погружающихся преимущественно к югу и юго-западу («под Печенгскую структуру»).

Становление пластовых интрузий пикрит-долеритов в кристаллических породах архея обрамления Печенгского палеорифта рассматривается [Морозов и др., 2017] как синдеформационное относительно формирования пологих надвигов (со сдвиговой компонентой), зафиксированных как в архейских метаморфитах фундамента, так и в породах «палеопротерозойского чехла» – осадочно-вулканогенного печенгского комплекса.

В архейских метаморфитах, подстилающих образования печенгского комплекса, по данным изучения керн Кольской сверхглубокой скважины, эквивалентом даек пикрит-долеритов

северного обрамления Печенгской структуры, возможно, являются многочисленные тела ортоамфиболитов – пород основного-ультраосновного состава. Доля этих раннепротерозойских ортоамфиболитов, судя по составу редкоземельных элементов, среди всех ортоамфиболитов архейской части разреза скважины составляет около 80 % [Ветрин, 2007].

В целом формирование комплекса пластовых (исходно – субгоризонтально залегающих) интрузий основного-ультраосновного состава в архейском фундаменте Печенгской рифтовой структуры и в низах разреза палеопротерозойского печенгского комплекса свидетельствует, как отмечено в [Морозов и др., 2017], о существенной перестройке тектонического режима на рубеже примерно 2,2 млрд лет.

Восточная Финляндия, район Коли (зона контакта архейского фундамента и палеопротерозойских отложений Карельского пояса). Комплекс палеопротерозойских мафит-ультрамафитовых интрузий – карьялиты или GWA (габбро-верлитовая ассоциация) [Vuollo, Piirainen, 1992; Hanski et al., 2010], включающий субгоризонтальные расслоенные интрузии в породах архейского кристаллического фундамента, широко распространен в Восточной и Северной Финляндии. Протяженность этих силлов – от нескольких до 150 км, мощность – 200–400 м.

В районе Коли (Восточная Финляндия) расслоенная субгоризонтально залегающая мафическая интрузия приурочена к зоне контакта архейских тоналитов, гранодиоритов и гранитов (с возрастом 2,9–2,6 млрд лет) с ятулий-

скими (нижнепротерозойскими) кварцитами и аркозами группы Herajärvi (2,3–1,97 млрд лет) [Vuollo, Piirainen, 1992; Sorjonen-Ward, 2006] и локализована частично в гранитоидах фундамента (до глубины около 200 м ниже поверхности контакта), частично – в породах двух нижних горизонтов ятулийского разреза (рис. 2, А). Длина (на поверхности) силла Коли – около 60 км, мощность – 340 м, площадь его оценивается в сотни квадратных километров. Гравитационная расслоенность силла Коли определяется сменой снизу вверх верлитов через клинопироксениты гранофирами. Датировки абсолютного возраста этих интрузивных пород составляют по U-Pb 2170 ± 40 и 2212 ± 30 млн лет [Vuollo, Piirainen, 1992; Hanski et al., 2010].

Пример расслоенного силла Коли (типичного представителя магматизма 2,2 млрд лет

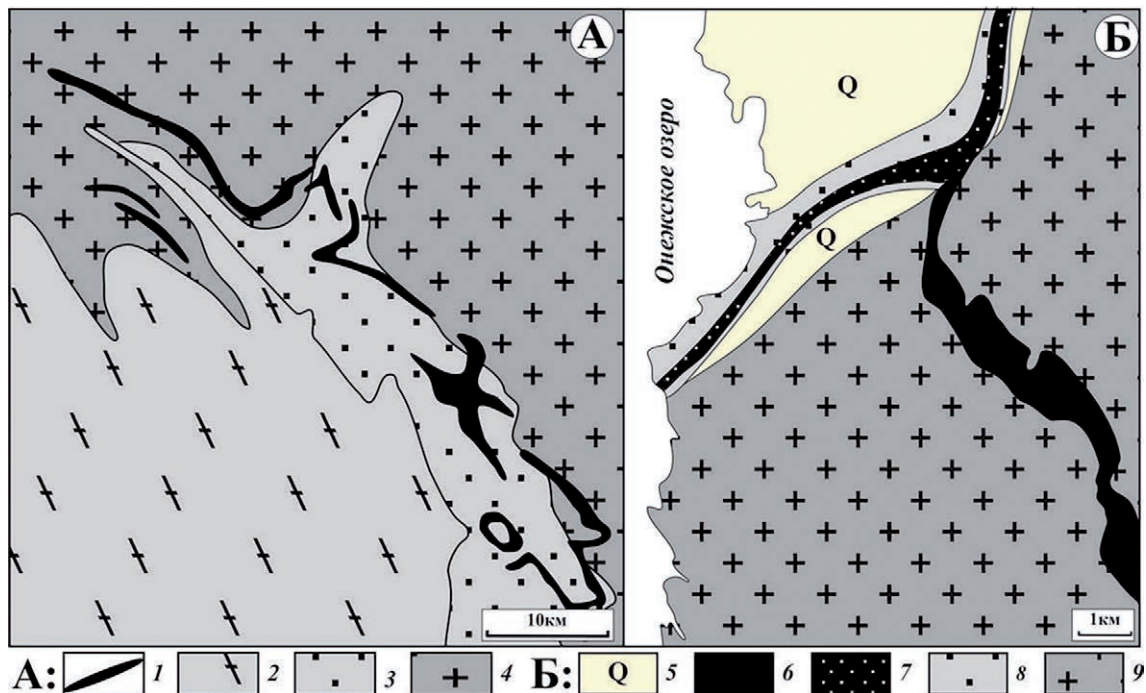


Рис. 2. Субгоризонтальные мафические интрузии (силлы) в кристаллическом фундаменте Фенноскандинавского щита:

А – силл Коли в зоне контакта архейского основания и чехла (Восточная Финляндия): 1 – силл Коли, 2 – калевий (сланцы), 3 – ятулий (кварциты и аркозы Herajärvi Group), 4 – архейские гранитоиды (по: [Sorjonen-Ward, 2006], с изменениями и упрощениями);

Б – силлы в зоне контакта основания и чехла восточного побережья Онежского озера (Карелия): 5 – четвертичные отложения, 6 – Пудожгорский силл, 7 – Габневский силл, 8 – ятулий (доломиты и эффузивы основного состава), 9 – гранитоиды архей/раннего протерозоя [по: Трофимов и др., 2006; Трофимов, Голубев, 2008, с изменениями и упрощениями]

Fig. 2. Subhorizontal mafic intrusions (sills) in the crystalline basement of the Fennoscandian Shield.

А – Koli sill in the contact zone of the Archean basement and cover (Eastern Finland): 1 – Koli sill, 2 – Kalevium (mica schists), 3 – Yatulum (quartzites and arkose of the Herajärvi Group), 4 – Archean granitoids [after: Sorjonen-Ward, 2006, with changes and simplifications];

Б – sills in the contact zone of the basement and cover of the eastern coast of Lake Onega (Karelia): 5 – Quaternary deposits, 6 – Pudozhgorsky sill, 7 – Gabnevsky sill, 8 – Yatulum (dolomites and effusive rocks), 9 – Archean / early Proterozoic granitoids [after: Trofimov et al., 2006; Trofimov, Golubev, 2008, with changes and simplifications]

в восточной и северной частях Фенноскандинавского щита), как считается в [Pekkarinen, Lukkarinen, 1991; Paleoproterozoic..., 2005], указывает, что эти интрузии относятся к единичному магматическому эпизоду, т. е. кристаллизуются от единичной магматической пульсации, производной более примитивной магмы, нежели более молодые магматиты. При этом Nd-изотопные данные свидетельствуют, что магма, ответственная за внедрение интрузий GWA (габбро-верлитовой ассоциации с возрастом 2220 млн лет) в различных районах Северной и Восточной Финляндии, была изотопно однородной. И этот эпизод GWA-магматизма был довольно кратковременным событием – видимо, даже короче, чем разрешающая способность методов датирования [Hanski et al., 2010].

В геодинамическом отношении становление комплекса мафит-ультрамафитовых интрузий карьялитов (GWA), включая силл Коли, относится ко времени достаточно тектонически спокойного режима континентального осадконакопления ятулийских терригенных пород – до начала накопления связанных с рифтингом континентальной окраины турбидитов, граувакк, черных сланцев и BIF калевиа [Laajoki, 2005].

Карелия, Восточное Прионежье, Пудож (Онежская палеопротерозойская структура). На восточном побережье Онежского озера субгоризонтально залегающие пластовые интрузии Пудожгорского долерит-габбродиоритового комплекса (силлы Пудожгорский и Габневский) приурочены, как в Северной и Восточной Финляндии, к зоне контакта кристаллического фундамента и ятулийского палеопротерозойского чехла [Онежская..., 2011]. Фундамент сложен гранитоидами (граниты, плагиограниты и гранито-гнейсы) нерасчлененного комплекса архея – раннего протерозоя. Чехольный комплекс представлен вулканогенно-осадочной толщей ятулия: доломитами и лавами основного состава.

Расположенный целиком в гранитоидах фундамента Пудожгорский силл представляет собой пластовое тело мощностью 100–140 м северо-западного простирания с пологим (средний угол падения 10–15° [Трофимов, Голубев, 2008; Онежская..., 2011]) падением к юго-западу, прослеженным по простиранию на 25 км. На северо-западе Пудожгорский силл смыкается с Габневским силлом, залегающим в карбонатных породах нижнего горизонта ятулийского разреза (рис. 2, Б). На некоторых участках установлена связь силлов с хрупкими разрывными нарушениями вмещающих пород [Онежская..., 2011]. Оба силла, Пудожгорский и Габневский, четко дифференцированы: от долеритов до диоритов и монцогранитов.

Предполагается, что эпизод становления этих силлов протоплатформенной толеит-базальтовой формации относительно непродолжительный – около 40 млн лет [Онежская..., 2011]. И этот кратковременный эпизод «силлогенеза» проявлен на фоне длительного стабильного прогибания Онежской впадины и накопления эпиконтинентальных отложений – времени, не отмеченного какими-либо серьезными внутрiformационными тектоническими событиями.

Центральный Алдан (Ималыкский железорудный район). Очень широко распространены пластовые интрузии в кристаллическом фундаменте и в низах разреза платформенного чехла по северной окраине Алданского щита. В отличие от вышеприведенных примеров здесь эти субгоризонтально залегающие интрузии имеют щелочной состав.

Кристаллический фундамент Центрального Алдана представлен архейскими метаморфитами: гнейсами и кристаллосланцами верхнеалданской и федоровской серий иенгрского комплекса. Платформенный чехол сложен неметаморфизованными терригенными и карбонатными отложениями венда и нижнего кембрия. С мезозойской эпохой активизации связано становление в юре-мелу алданского комплекса щелочных и щелочноземельных интрузий, включающего силлы, дайки, штоки и лакколитоподобные тела щелочных и нефелиновых сиенитов, сиенит-порфиоров, лампроитов, щелочных гранитов [Хомич, Борискина, 2016].

Эти интрузии преимущественно пластовой формы сконцентрированы в значительной степени в зоне контакта фундамент-чехол (рис. 3). Большое количество этих интрузий (мощность которых колеблется в широких пределах – от первых десятков сантиметров до многих десятков метров) в виде силлов залегает в нижней части чехла; многие секут метаморфиты докембрийского цоколя, а некоторые тела (в т. ч. Мурунский массив с уникальным месторождением чароита) приурочены почти точно к поверхности структурного несогласия между фундаментом и чехлом [Петров, 1976, 1978].

Многочисленные субгоризонтальные интрузии сиенитов в докембрийском фундаменте были вскрыты скважинами в ходе разведки железорудных месторождений Ималыкского района. Здесь особый интерес представляет возможность определить природу тектонических зон, к которым в большинстве случаев приурочены пластовые интрузии сиенитов: некоторые из таких зон заполнены сиенитами только на часть своей мощности, а некоторые вообще не содержат сиенитовых тел.

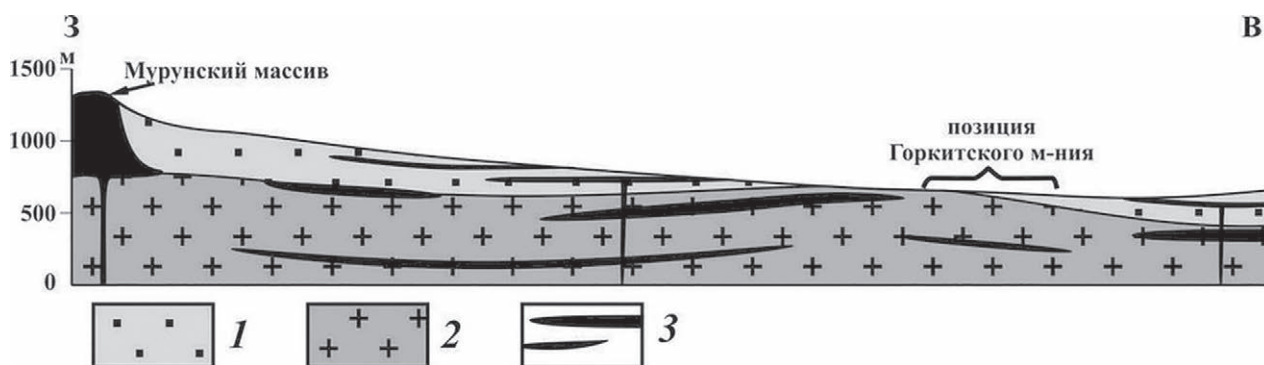


Рис. 3. Схема локализации субгоризонтальных пластовых интрузий сиенитов в зоне контакта фундамент-чехол северной окраины Алданского щита (междуречье Чары и Токко, Ималыкский железорудный район):

1 – отложения платформенного чехла (венд-кембрий), 2 – архейские метаморфиты фундамента, 3 – мезозойские сиениты

Fig. 3. Scheme of localization of subhorizontal sheets of syenites in the contact zone of the basement and cover of the northern margin of the Aldan Shield (interfluvium of Chara and Tokko, Imalyk iron ore region):

1 – deposits of platform cover (Vendian – Cambrian), 2 – Archean metamorphic rocks of the basement, 3 – Mesozoic syenites

Сложены подобные (бессиенитовые) тектонические зоны раздробленными, очень сильно дезинтегрированными (обычно до состояния какиритов или тектонического песка) метаморфитами, мощность зон – от первых метров до нескольких десятков метров, ориентированы они субгоризонтально и почти под прямым углом секут субвертикальные пластины докембрийских пород. При этом по данным буровых и геофизических работ установлено отсутствие какого-либо смещения блоков (крыльев) по этим мощным разломным зонам: контрастность разреза докембрийских образований здесь позволяет уверенно проследить отдельные маркирующие пластины метаморфитов над и под этими субгоризонтальными зонами – без признаков смещения (рис. 4, А). Более того, по составу обломков в тектонитах (брекчиях, какиритах, тектоническом песке) этих зон маркирующие пластины (амфиболитов, железистых кварцитов, скарноидов, гнейсов, гранитоидов) можно протрассировать и через сами тектонические зоны [Кулаковский, 1979].

По всей видимости, «сухие», не заполненные магмой субгоризонтальные зоны дробления *in situ* в кристаллическом фундаменте, подобные алданским, сохраняются далеко не везде и нередко наследуются зонами сколовой деформации (и преобразуются в надвиги или сдвига-надвиги) и/или используются интрузивными телами. Однако изредка все-таки подобные «сухие» зоны дробления в массивных, нетекстурированных кристаллических породах могут встречаться.

Подобные зоны дезинтегрированных пород («моро») были описаны в гранитах рапакиви на юго-западе Финляндии [Eskola, 1930].

Раздробленность имеет гравийную размерность. Никаких минеральных и текстурных различий между породами в обломках этих зон и монолитными гранитами нет, как нет и признаков структурно-деформационной анизотропии в породах «моро». Контакты «моро» с недезинтегрированными гранитами резкие, без признаков тектонических подвижек по ним (рис. 4, Б). Тем не менее некоторое количество субгоризонтальных трещин придает породе сланцеватый облик.

Антарктида, Земля Виктории (Сухие долины Мак-Мердо). Это, наверное, наиболее обнаженный и изученный из районов распространения пластовых интрузий в мире.

Кристаллический фундамент на Земле Виктории сложен метаморфитами (кристаллосланцами и гнейсами) позднедокембрийского-кембрийского возраста и массивными гранитоидами (кварцевыми диоритами, кварцевыми монцонитами, гранитами) раннепалеозойского возраста [Hamilton et al., 1965; Muirhead et al., 2012]. Метаморфическая полосчатость ориентирована обычно субвертикально. На плоской, практически горизонтальной поверхности фундамента так же горизонтально залегают почти не деформированные кластические породы (песчаники, алевролиты) супергруппы Veasop (девон-пермь), которую, вместе с вышезалегающими нижнеюрскими базальтами Kirkpatrick, рассматривают [Jerram et al., 2010] как эквивалент формации Karoo Южной Африки.

Зона контакта фундамент-чехол насыщена мощными пластовыми интрузиями среднего-основного состава: долеритами, кварцевыми диабазами, габброидами и в незначительном

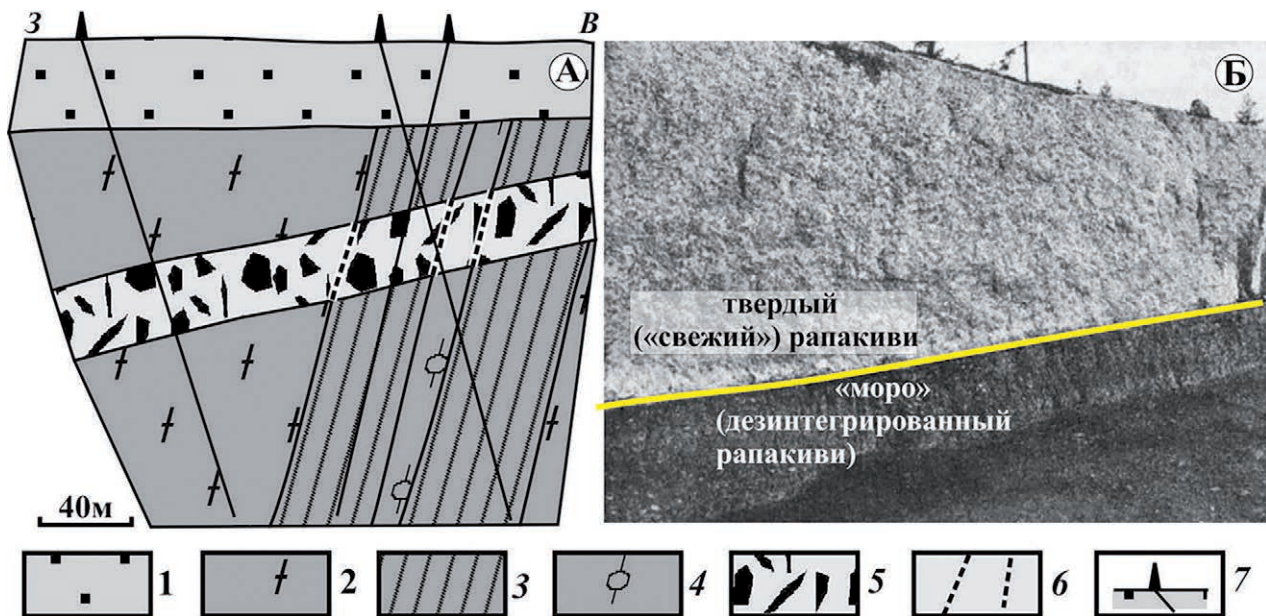


Рис. 4. Пологопадающие зоны дробления *in situ* в кристаллических породах докембрийского фундамента:

А – в разрезе Горкитского месторождения железистых кварцитов Алданского щита (позицию м-ния см. на рис. 3): 1 – терригенные породы венда, 2–4 – докембрийские метаморфиты (2 – гранито-гнейсы, 3 – железистые кварциты, 4 – скарноиды), 5 – тектонические брекчии, какириты, песок, 6 – геологические границы, трассируемые через зону дробления, 7 – буровые скважины;

Б – в гранитах рапакиви Фенноскандинавского щита, Юго-Западная Финляндия, район Laitila (по: [Eskola, 1930], с небольшими изменениями и дополнениями)

Fig. 4. Gently dipping crushing zones *in situ* in crystalline rocks of the Precambrian basement.

А – in the section of the Gorkit BIF deposit of the Aldan Shield (see the position of the deposit in Fig. 3): 1 – Vendian terrigenous rocks, 2–4 – Precambrian metamorphites (2 – granite-gneisses, 3 – iron quartzites, 4 – skarnoids), 5 – tectonic breccias, kakirite, sand, 6 – geological boundaries, traced through the crushing zone, 7 – boreholes.

В – in rapakivi granites of the Fennoscandian Shield, southwestern Finland, Laitila region (after: [Eskola, 1930], with minor changes and additions)

объеме – гранофирами [Hamilnon et al., 1965]. Время внедрения этих интрузий (комплекса Ferrar Dolerite), по K-Ar методу, – средняя юра. Эти силлы, вместе с базальтами Kirkpatrick, а также с диабазами подводящих даек, секущих отложения чехла, составляют огромную по масштабу магматическую систему, становление которой связывают [Jerram et al., 2010] с распадом Гондваны.

В породах чехла интрузии долеритов представляют собой типичные силлы, залегающие горизонтально или с очень малым углом падения, мощностью от 10 до нескольких сотен метров. Примерно по контакту фундамента и чехла, переходя местами на нижние горизонты разреза супергруппы Veason, располагается силл Реперлайн, мощность которого меняется от 200 до 450 м. Близкую мощность имеет и полностью размещенный в породах фундамента силл Basement (рис. 5). Суммарная мощность всех пластин долеритов в разрезах Земли Виктории – около 1 км, а площадь отдельных пластин может достигать по меньшей мере 2,5 тыс. кв. км [Hamilnon et al., 1965].

Расстояние от кровли самой нижней пластины долеритов (Basement sill) до подошвы чехольного комплекса варьирует преимущественно в пределах 150–450 м, иногда уменьшаясь почти до 0 или возрастая до 1000–1200 м. Примечательно, что эта нижняя пластина долеритов залегает почти целиком в массивных гранитоидах фундамента, но не в гнейсах и кристаллосланцах с их субвертикальной полосчатостью. В пластине Basement sill зафиксирована дифференциация по составу [Jerram et al., 2010]: базальты у подошвы пластины переходят вверх через диабазы к габбро (основная часть пластины), а самые верхи интрузии сложены гранофирами и диабазами. На некоторых участках закартированы обогащенные ортопироксеном «языки», отходящие от основного тела нижней пластины (Basement sill).

Юго-запад США (Аризона, Калифорния) и запад Канады (Альберта, Саскачеван). Кристаллический фундамент Северо-Американской платформы на юго-западе США сложен [Howard, 1991] раннепротерозойски-

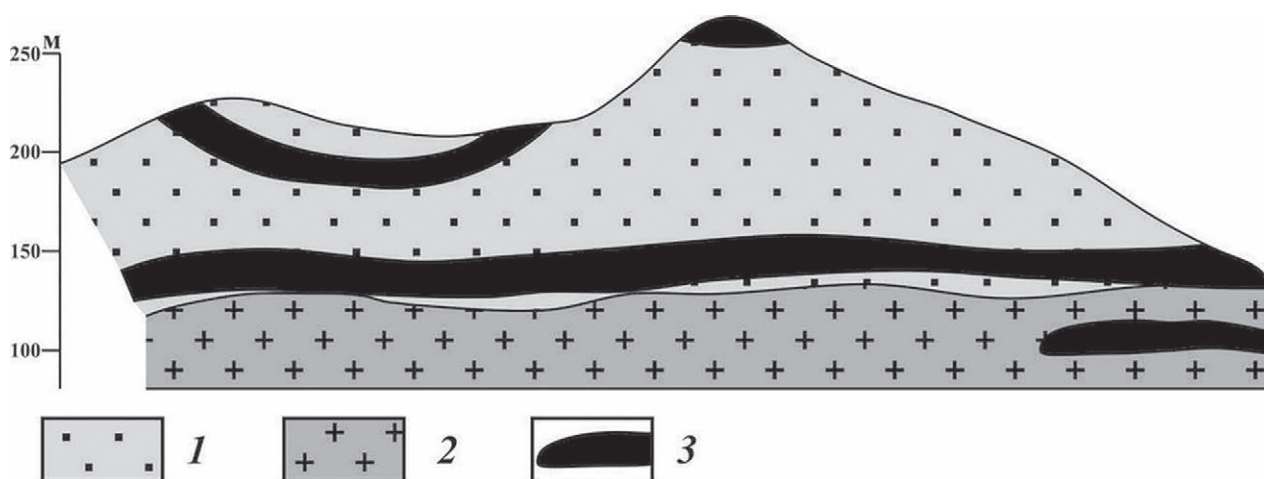


Рис. 5. Субгоризонтальные пластовые мафические интрузии в зоне контакта фундамент-чехол Земли Виктории (Антарктида):

1 – пермские песчаники, алевролиты, сланцы, 2 – кристаллический фундамент (поздний докембрий – ранний палеозой), 3 – юрские кварцевые диабазы (по: [Hamilton et al., 1965], с упрощением)

Fig. 5. Subhorizontal sheetlike mafic intrusions in the contact zone of the basement and cover of Victoria Land (Antarctica):

1 – Permian sandstones, siltstones, shales, 2 – crystalline basement (Late Precambrian – Early Paleozoic), 3 – Jurassic quartz diorites (after: [Hamilton et al., 1965], with simplification)

ми метаморфитами (гнейсами и кристалло-сланцами), а также среднепротерозойскими (1,4 млрд лет) гранитами. Низы чехольного комплекса платформы представлены кластическими и карбонатными породами (и кое-где мафическими лавами) группы Арасче среднего протерозоя мощностью (в Аризоне) 850 м. Более молодые, от кембрийских и вплоть до третичных, отложения чехла перекрывают супракрустальные породы среднего протерозоя или залегают непосредственно на породах фундамента.

Зона контакта ранне-среднепротерозойского гранитогнейсового фундамента с породами чехла (группы Арасче или более молодыми) насыщена огромным количеством изначально субгоризонтальных пластовых интрузий диабазов (оливиновых и кварцевых толеитов) среднего протерозоя (интрузии в породах чехла, а также по поверхности контакта фундамент-чехол обычно именуют силлами, а интрузии в фундаменте – горизонтальными дайками или пластовыми интрузиями). Возраст интрузий, определенный различными методами, варьирует от 1,07 до 1,2 млрд лет.

Данный регион уникален тем, что диабазовые «горизонтальные дайки» в породах фундамента являются преобладающими среди интрузивных тел, причем тяготеют они (как и в Земле Виктории) к массивным гранитам и в гораздо меньшем количестве встречаются в метаморфитах, где секут крутопадающую

расслоенность последних, равно как и контакт метаморфитов и гранитов (рис. 6).

Палеоглубины внедрения пластовых интрузий данного региона оцениваются [Howard, 1991] от нуля (предположительно в чехольном комплексе присутствуют и экструзивные комагматы диабазов) до как минимум 13 километров. Однако максимальная концентрация интрузий, равно как и максимальная мощность индивидуальных пластин (до 350 м при протяженности до 30 км) отмечается на глубине первых трех километров от подошвы чехла; глубже мощность горизонтальных даек в фундаменте обычно колеблется от первых метров до нескольких десятков метров. Интервалы между пластинами непостоянные по мощности, но обычно около 100 м. Нередко в пластинах диабазов отмечается гравитационная дифференциация (концентрация оливиновых кристаллов в низах) как свидетельство исходно горизонтального положения пластин.

Оценка деформационной обстановки формирования пластовых интрузий на юго-западе США довольно неопределенна. Предполагается [Howard, 1991], что пластины распространялись перпендикулярно оси растяжения («наподобие процесса гидроразрыва») и что такая ориентировка подразумевает или обстановку горизонтального сжатия («как при надвигах»), или изотропное (литостатическое) поле напряжений. Отмечается, что в региональном масштабе такая деформационная обстанов-

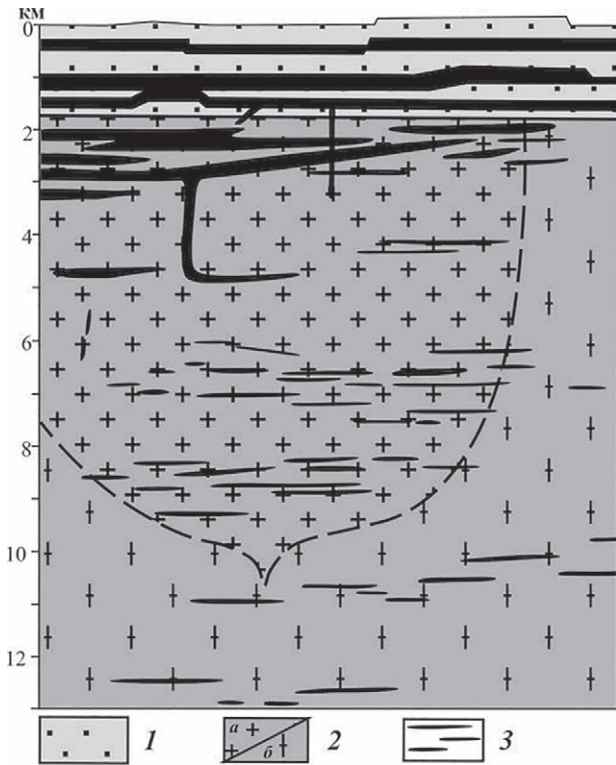


Рис. 6. Субгоризонтальные пластовые интрузии диабазов в зоне контакта фундамент-чехол на юго-западе США:

1 – осадочные породы среднего протерозоя, 2 – фундамент (а – граниты, б – гнейсы), 3 – диабазы (по: [Howard, 1991], с упрощением)

Fig. 6. Subhorizontal diabase sheets in the contact zone of the basement and cover in the southwestern United States:

1 – sedimentary rocks of the Middle Proterozoic, 2 – basement (a – granites, b – gneisses), 3 – diabases (after: [Howard, 1991], with simplification)

ка нехарактерна для базальтоидного магматизма с возрастом 1,0–1,3 млрд в Северной Америке, который здесь повсеместно связан с тектоническим растяжением. Альтернативная трактовка – внедрение пластовых интрузий по ранее возникшим трещинам в породах фундамента – отрицается.

Здесь, на юго-западе США, достаточно подробно изучена и убедительно доказана возможность идентификации пластовых интрузий (как в чехле, так и в фундаменте) на сейсмограммах. Ключевым районом в этих исследованиях явилась центральная и западная часть штата Аризона благодаря хорошей обнаженности и наличию многочисленных буровых скважин. Здесь было установлено, что совокупность сильных сейсмических отражений (BRS – Bagdad Reflection Sequence) на глубине 3–15 км в гнейсах фундамента по Аризонскому трансекту обусловлена наличием субгоризонтальных пла-

стин мафических интрузий [Litak, Hauser, 1992], которые сгруппированы в несколько полос или ярусов (эшелонов), разделенных по вертикали неотражающими зонами мощностью 1–3 км, прослеженных по простиранию на десятки километров, суммарной мощностью примерно 10 км (рис. 7).

Данные сейсмопрофилирования и бурения во многих районах Северо-Американской платформы позволяют предполагать исключительно широкое распространение субгоризонтальных пластовых интрузий основного состава в породах как чехла, так и кристаллического основания платформы. Особенно детально изучена проблема интерпретации природы сейсмических отражений в Западно-Канадском осадочном (нефтегазоносном) бассейне – провинциях Альберта и Саскачеван. В Северной Альберте на сейсмическом 3D-профиле отраженных волн ярко выражены протяженные отражения в средней коре, соответствующие пластинам («силлам») протерозойских долеритов в кристаллическом основании (рис. 8).

В Центральной Альберте серия отражений «Winagami» на глубинах 3,5–18,5 км обусловлена пластовыми интрузиями, секущими петроструктуру кристаллических пород фундамента [Ross et al., 1997; Welford, Clowes, 2004; Welford et al., 2007]. В Южной Альберте серия отражений «Head-Smashed-In» соответствует субгоризонтальным пластинам диабазов мощностью от 10 до 150 м [Mandler, Clowes, 1997]. В Северном Саскачеване серия отражений «Wollaston Lake reflector» на глубинах 6–13,5 км связана с пластинами среднепротерозойских диабазов мощностью 50–150 м [Mandler, Clowes, 1998].

Шотландия, Внутренние Гебриды (остров Малл). Кристаллический фундамент на острове сложен метаморфитами неопротерозойской супергруппы Мойн: метаосадочными кварцитами, слюдяными псаммитами, пелитами и пелитовыми гнейсами. Расслоенность метаморфитов залегает субвертикально, в них зафиксированы трещины трех систем: субвертикальной, наклонной и субгоризонтальной. Чехольный комплекс включает залегающие горизонтально мезозойские сланцы и песчаники мощностью примерно 200 м и вышележащие лавы и вулканокластические породы палеогена мощностью 1,8 км [Stephens et al., 2017].

К магматитам толеитового состава палеогенового комплекса Loch Scridain Sill относятся силлы в породах как фундамента, так и чехла, дайки, а также «Центральный комплекс» из трех слившихся вулканических центров. В породах фундамента силлы секут и расслоенность ме-

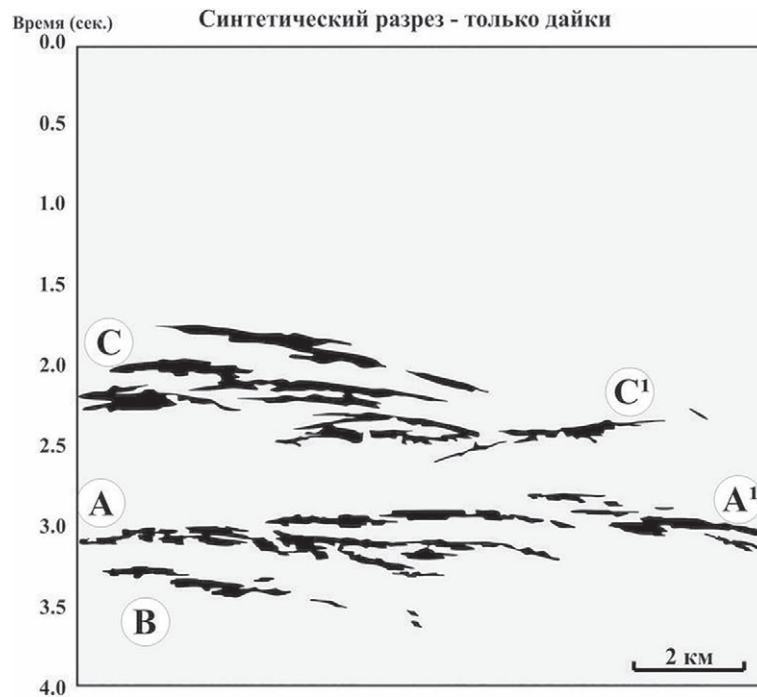


Рис. 7. Синтетический сейсмический разрез района Buck Mountains (Аризона) по отражениям от горизонтальных даек диабазов (черные), сгруппированных в «полосы» С–С', А–А' и В. Вертикальная шкала – двойное время пробега в секундах (по: [Litak, Hauser, 1992], с изменениями и упрощениями)

Fig. 7. Synthetic seismic section of the Buck Mountains (Arizona) by reflections from horizontal diabase dikes (black), grouped into “bands” С–С', А–А' and В. Vertical scale – double travel time in seconds (after: [Litak, Hauser, 1992], with changes and simplifications)

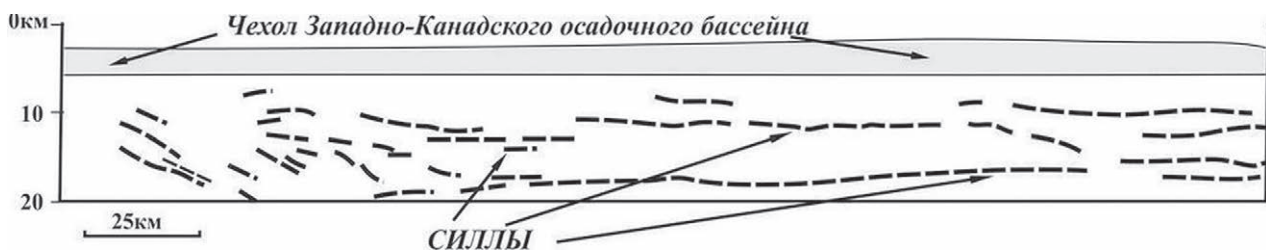


Рис. 8. Силлы (горизонтальные дайки) протерозойских долеритов (пунктир) в кристаллическом основании на сейсмическом профиле в Северной Альберте, Канада (по: [Welford, Clowes, 2006], с упрощениями и дополнениями)

Fig. 8. Sills (horizontal dikes) of Proterozoic dolerites (dotted lines) in a crystalline basement on a seismic profile in Northern Alberta, Canada (after: [Welford, Clowes, 2006], with simplifications and additions)

таморфитов (почти под прямым углом (рис. 9)) и дайки. При этом для силлов в фундаменте отмечаются небольшие ступени, осложняющие их морфологию – по ранее возникшим трещинам различной ориентировки, а также по плоскостям субвертикальной расслоенности метаморфитов. Отсюда авторы работы [Stephens et al., 2017] делают вывод, что в локальном масштабе разрывы и литология играют важную роль в контроле механизма внедрения и морфологии исходных сегментов силла, однако в целом геометрия, вероятно, контролируется «дальним полем напряжения».

Во всех случаях маркеры смещения по контактам силлов с вмещающими метаморфитами указывают на почти вертикальное направление раскрытия. Модель становления силлов в фундаменте, предложенная в [Stephens et al., 2017], включает последовательно: а) почти радиальное горизонтальное укорочение, вызывающее зарождение горизонтальных трещин растяжения и субгоризонтальных трещин растяжения-сдвига, б) внедрение в эти горизонтальные и субгоризонтальные трещины толеитовой магмы и в) увеличение объема («разбухание») сегментов силла, приводящее к разрастанию



Рис. 9. Силл (горизонтальная дайка) палеогеновых толеитов в докембрийских метаморфитах о. Малл, Шотландия (по: [Stephens et al., 2017], с упрощениями и дополнениями)

Fig. 9. Sill (horizontal dike) of Paleogene tholeiites in the Precambrian metamorphic rocks of Mull Island, Scotland (after: [Stephens et al., 2017], with simplifications and additions)

и разветвлению трещин, облегчающих поток магмы и определяющих усложненную геометрию силлов. В региональном масштабе формирование в обстановке горизонтального сжатия интрузий комплекса Loch Scridain Sill связано, как предполагают авторы работы [Stephens et al., 2017], с тектоническими движениями фазы рифтинга и спрединга (~ 55 млн лет) при формировании Северной Атлантики.

Центральная Швеция, Сильян (Siljan Ring area). Девонская астроблема Сильян в Центральной Швеции детально изучалась в 1980-х годах в ходе поисковых работ на abiогенный газ. Поиски оказались безуспешными, но были получены уникальные результаты по интерпретации и корреляции данных сейсморазведки с глубинной геологией – ниже поверхности раздела фундамент-чехол.

Кристаллический фундамент здесь сложен [Juhlin, 1990, 2016; Papasikas, Juhlin, 1997] свекофенскими (древнее 1,75 млрд лет) метаморфитами и гранитоидами более молодого (1,68–1,74 млрд лет) Трансскандинавского гранит-порфиорового пояса. Отложения чехла, имеющие в районе астроблемы крайне ограниченное распространение и малую, не более 350 м, мощность, представлены палеозойскими (силур и ордовик) известняками и кластическими осадками. Но в том же округе Даларна, где расположена структура Сильян, известны и более древние чехольные отложения субиотния и иотния – базальные конгломераты, порфиры и песчаники Дала (последние – с пластовыми телами диабазов); возраст субиотнийских порфиров Дала, определенный Rb-Sr-методом, – 1669 млн лет [Welin, Lundqvist, 1970].

В районе Сильян были пройдены две сверхглубокие скважины: Grayberg-1 (6957 м) и Stenberg-1 (6900 м). Сопоставление данных бурения и геофизических работ на поверхности и в скважинах показало четкое соответствие высокоамплитудных отражений с глубин более 1,5 км на сейсмопрофилях многочисленным пластовым субгоризонтальным интрузиям долеритов в гранитоидах фундамента [Juhlin, 1990; Papasikas, Juhlin, 1997].

В скважине Grayberg-1 такие отражения отвечают либо отдельным долеритовым пластинам (мощностью 20 и 60 м), либо пакетам сближенных менее мощных (3–9 м) пластин (рис. 10). В скважине Stenberg-1 на глубинах около 6 км вскрыты четыре долеритовые пластины мощностью 25–90 м и несколько маломощных пластин на глубинах менее 5,7 км. Площадь распространения отдельных пластовых интрузий долеритов, по геофизическим данным, составляет по крайней мере 800 км². Возраст долеритов пластин оценивается, по аналогии с возрастом близких по составу даек на поверхности, в 0,9–0,97 млрд лет (поздний рифей).

Обсуждение результатов

Формирование субгоризонтальных пластовых интрузий в кристаллическом фундаменте, как можно видеть из вышеприведенных данных, представляет собой процесс, достаточно широко проявленный и в пространстве и во времени. Объем горизонтальных даек основного или щелочного состава достигает очень больших значений – при мощности единичных

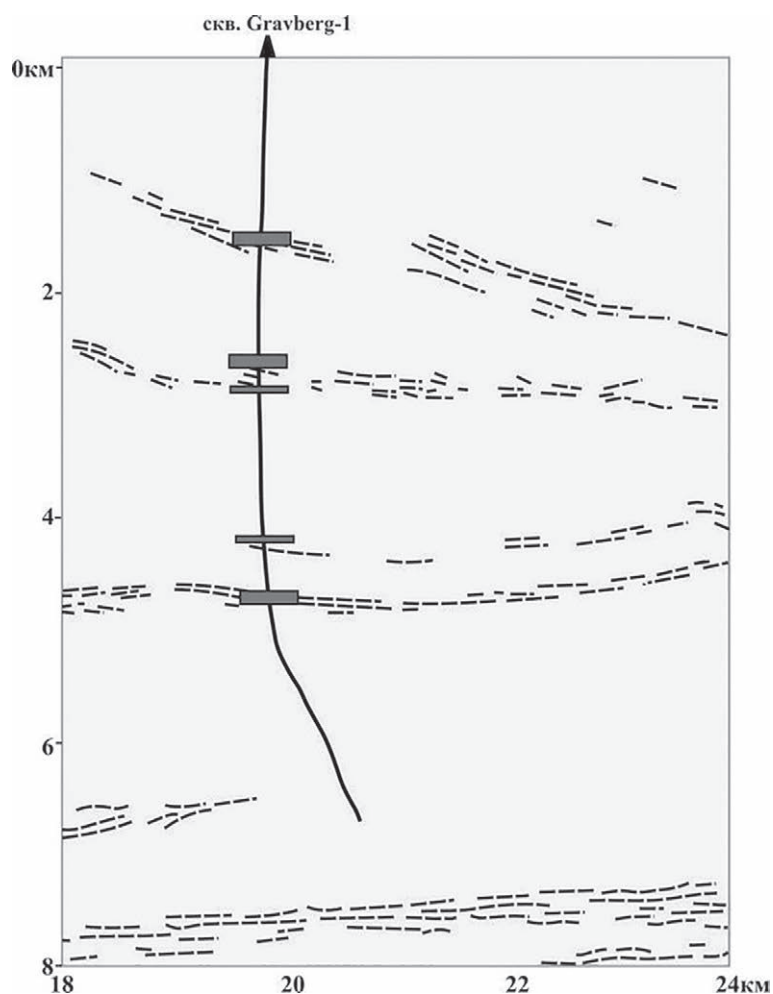


Рис. 10. Сейсмические отражения (пунктир) от пластовых интрузий долеритов (черные интервалы по керну скважины) в гранитоидах фундамента в скважине Gravberg-1, Центральная Швеция (по: [Juhlin, 2016], с упрощениями и дополнениями)

Fig. 10. Seismic reflections (dashed lines) from dolerite sheets (black intervals along the core of the well) in the granitoids of the basement in the well Gravberg-1, Central Sweden (after: [Juhlin, 2016], with simplifications and additions)

интрузий в сотни метров площадь их распространения может исчисляться тысячами и многими десятками тысяч квадратных километров. Возраст их варьирует от палеопротерозоя до палеогена.

Достаточно очевидно, что необходимым условием становления этих интрузий является наличие границы контрастных по физико-механическим свойствам сред – массивных (квазиизотропных) гранитоидов или метаморфитов с субвертикально ориентированной расчлененностью кристаллического фундамента с одной стороны и субгоризонтально залегающих слоистых осадочных пород чехла с другой. При этом интервал времени от момента возникновения этой поверхности раздела (т. е. от нача-

ла накопления осадков чехольного комплекса) до эпизода «силлогенеза» может быть самым различным. Нередко возникновение комплекса горизонтальных даек в фундаменте относится еще ко времени формирования отложений нижних или средних горизонтов разреза чехла, но иногда, как на Алданском щите, отстоит от начала формирования чехольного комплекса на сотни миллионов лет.

Глубина распространения горизонтальных даек (или «пакетов» этих пластовых интрузий) вниз от подошвы чехольных отложений обычно варьирует от 0 («межформационные силлы», локализованные примерно по контакту фундамент-чехол) до первых километров; реже достигает 6–7 км, а может даже превышать

10 км. Там, где кристаллический фундамент изучен (геофизическими методами, буровыми скважинами) на большую глубину (юго-запад США, Западно-Канадский нефтегазоносный бассейн, астроблема Сильян в Центральной Швеции), твердо установлено, что горизонтальные дайки в гранитоидах и метаморфитах организованы в многоярусные системы, в которых эти дайки сгруппированы в полосы (эшелоны), разделенные по вертикали интервалами с небольшим числом даек или вообще без таковых.

Как установлено в провинции Альберта (Канада), залегание силлов мощностью в десятки и сотни метров (определяющих серию сейсмических площадок «Head-Smashed-In») в фундаменте точно соответствует конфигурации поверхности контакта фундамент-чехол: на участках его максимального прогибания и, соответственно, возрастания мощности и угла падения отложений чехла, точно так же меняется залегание (с флексурным изгибом) и горизонтальных даек диабазов в кристаллическом фундаменте [Mandler, Clowes, 1997]. То есть эти дайки в фундаменте изначально были ориентированы строго параллельно (неровной) поверхности контакта фундамент-чехол.

Горизонтальные дайки в кристаллическом фундаменте практически всегда являются одним из элементов крупных магматических комплексов, включающих, помимо горизонтальных даек, и питающие дайки, и силлы в отложениях чехла, а также иногда и мелкие интрузивные и субвулканические тела и лавовые покровы: комплекс Ferrar Dolerite в Антарктиде, Loch Scridain Sill Complex острова Малл в Шотландии, GWA (габбро-верлитовая ассоциация) в Финляндии, Алданский щелочной интрузивно-вулканогенный комплекс и др. И, как отмечено при описании интрузий Земли Виктории в Антарктиде, такие комплексы вместе с эффузивными комагматами могут составлять огромные по масштабу объединенные магматические системы.

Как правило, в горизонтальных дайках фиксируется четкая гравитационная дифференциация по составу, например (снизу вверх): диабазы – габбро – гранофиры и диабазы (Антарктида), верлиты – клинопироксениты и габбро – гранофиры (Коли, Финляндия), пикриты и коматииты – оливинсодержащие долериты (Кольский п-ов) и т. п. И подобная дифференциация однозначно указывает на исходно горизонтальное размещение этих пластовых интрузий.

Обращаясь к региональной геодинамической ситуации во время формирования маг-

матических комплексов, включавших горизонтальные дайки, в различных регионах, обнаружить какую-то специфику, существование общих, «сквозных» особенностей геодинамической обстановки «эпох силлогенеза» трудно.

На обширной территории Восточной и Северной Финляндии, а также в Карелии становление в палеопротерозое комплекса мафит-ультрамафитовых интрузий карьялитов (габбро-верлитовой ассоциации Финляндии), включающего горизонтальные дайки района Коли и долерит-габбродиоритового комплекса Онежской структуры с пластинчатой Пудожгорской интрузией, относится ко времени существования длительного, достаточно тектонически спокойного режима континентального осадконакопления ятулийских терригенных пород. И примечательно, что продолжительность этого эпизода «силлогенеза» и финские и российские исследователи оценивают как относительно небольшую: около 40 млн лет в Карелии [Онежская..., 2011] и менее чем «разрешающая способность методов датирования» в Финляндии [Hanski et al., 2010]. Так что силлогенез здесь носит характер кратковременной «вспышки» на фоне продолжительного стабильного прогибания поверхности кристаллического фундамента и накопления ятулийских осадков чехла.

Формирование мезопротерозойских (1,1–1,265 млрд лет) горизонтальных даек диабазов юго-запада США и Западной Канады предполагает [Howard, 1991] региональную обстановку горизонтального сжатия («как при надвигах») или изотропного (литостатического) поля напряжений. Но такая деформационная обстановка в Северной Америке, как замечено выше, нехарактерна для базальтоидного магматизма с возрастом 1,0–1,3 млрд лет, который здесь связан с тектоническим растяжением. Так что, по мнению автора работы [Howard, 1991], возможно, диабазовый магматизм (силлогенез) является магматизмом горячей внутриплитной точки.

Становление неопротерозойских (возраст 900–970 млн лет) долеритовых горизонтальных даек Сильяна (Центральная Швеция) можно, по аналогии с, видимо, синхронными (975–1000 млн лет) горизонтальными долеритовыми пластовыми интрузиями побережья Баренцева моря, залегающими как в терригенных породах рифейского чехла, так и в архейских метаморфитах фундамента [Пржиялковский и др., 2008], связать с процессами рифейского континентального рифтинга.

Внедрение среднеюрских горизонтальных даек кварцевых диабазов, долеритов и габ-

броидов Земли Виктории в Антарктиде, так же как и подобных пластовых интрузий Юго-Восточной Австралии и Южной Африки, относится к эпохе распада Гондваны. Щелочной магматизм юры-мела, включающий формирование горизонтальных даек сиенитов в фундаменте Алданского щита, представляет собой одно из событий мезозойской эпохи грандиозной тектоно-магматической активизации. А становление в палеогене магматического Loch Scridain Sill Complex Шотландии (включающего горизонтальные дайки толеитов в докембрийских метаморфитах острова Малл) относят [Stephens et al., 2017] к фазе рифтинга и спрединга при формировании Северной Атлантики.

Переходя к обсуждению деформационной обстановки формирования горизонтальных даек, подчеркнем уже упомянутый выше принципиальный момент: рассмотрению подлежат два в общем случае независимых механизма: а) возникновение в породах фундамента субгоризонтальных плоскостных структур, которые сделали возможным проникновение магмы в массивные квазиизотропные гранитоиды (или субвертикально расслоенные метаморфиты) и б) последующего внедрения (становления) самих субгоризонтальных пластовых интрузий.

В большинстве работ, так или иначе затрагивающих проблему становления горизонтальных даек в фундаменте, внимание исследователей ограничено механизмами внедрения этих интрузий и практически не рассматривается вопрос о механизмах возникновения «предваряющей» внедрение интрузий плоскостной анизотропии в породах фундамента, т. е. системы субгоризонтальных ослабленных плоскостей, игравших роль проводников магмы. По-видимому, единственная попытка рассмотрения возможного механизма возникновения такой «предсилловой» субгоризонтальной плоскостной анизотропии в породах фундамента содержится в работе, посвященной горизонтальным дайкам Земли Виктории в Антарктиде. Здесь предполагается [Hamilton et al., 1965], что локализация пластовой интрузии диабазов (Basement sill) мощностью 200–450 м в гранитоидах фундамента контролируется субгоризонтальными трещинами «отслоения», возникшими, возможно, в эпоху эрозии фундамента, т. е. до накопления кластических осадков чехла. Такие трещины «густеют» вверх от кровли Basement sill и «редеют» вниз от его подошвы, а на глубинах более 1 км от контакта фундамент-чехол практически исчезают. Подобные системы субгоризонтальных трещин описаны и в гранитоидах фундамента, вмещающих горизонтальные

дайки на юго-западе США, но здесь их рассматривают как возникающие одновременно с внедрением этих даек [Howard, 1991].

На Алданском щите, как отмечено выше, очевидна приуроченность горизонтальных даек сиенитов к зонам брекчирования *in situ* в гранитоидах и метаморфитах фундамента – зонам того же типа, по-видимому, что и субгоризонтальные зоны брекчированных гранитов рапакиви («того»), описанные П. Эскола в Финляндии (см. рис. 4, Б). В Ималыкском железорудном районе Алданского щита буровые скважины в кристаллическом фундаменте пересекают и горизонтальные дайки сиенитов, и зоны брекчирования, «залеченные» сиенитами только на часть своей мощности, и зоны брекчирования *in situ* вообще без сиенитов (см. рис. 4, А).

Связь горизонтальных даек с зонами брекчирования в породах кристаллического фундамента можно обнаружить и в других районах. Так, на юго-западе США, в Аризоне, установлено, что пластовые диабазовые интрузии ассоциируют с зонами брекчирования, так что иногда скважины, пересекающие сейсмические отражения, обусловленные этими интрузиями, вскрывают не диабазы, но зону хлоритизированных брекчий по гранитам. То есть, по мнению исследователей [Litak, Hauser, 1992], скважины проходят в промежутке между сегментами одной, но прерывистой по простиранию мафической пластины, внедрившейся в зону брекчирования в породах фундамента. Аналогичная картина «прерывистого» распространения, с многочисленными «лакунами» по простиранию, мафических пластин наблюдается и в коренных обнажениях в горах Buck Mountains (см. рис. 7) и в других районах [Mandler, Clowes, 1997].

В районе Сильян в Швеции, где на небольшом расстоянии друг от друга были пройдены две семикилометровые скважины, зафиксировано соответствие вскрытых скважинами пластин долеритов субгоризонтальным отражающим сейсмическим площадкам. При этом по данным бурения установлено, что некоторые из долеритовых пластовых интрузий отчетливо связаны с тектоническими зонами сильно трещиноватых (передробленных) гранитоидов. И, сравнивая данные по двум этим глубоким скважинам, можно заметить известную «взаимозаменяемость» в разрезе силлов долеритов и зон дробления в гранитах. Если в разрезе скважины Grayberg-1 на глубинах менее 5,7 км вскрыто несколько мощных и несколько менее мощных пластин долеритов (из которых три в интервале 4,6–4,8 км ассоциируют с зонами

дробления), то в скважине Stenberg-1 в этом же интервале глубин отмечено лишь несколько маломощных тел долеритов (некоторые – тоже в ассоциации с зонами брекчий), а также подобные зоны дробления, но без долеритов (наиболее четко проявленная из них – у отметки в 3 км) [Juhlin, 1990, 2016]. Таким образом, можно предположить, что здесь, как и в Аризоне, «прерывистые» пластины долеритов внедряются в граниты фундамента по субгоризонтальным зонам дробления.

Ассоциация мафитовых пластовых интрузий с зонами (участками) дробления гранитоидов и метаморфитов фундамента отмечается и в других районах распространения горизонтальных даек. Так, связь с хрупкими разрывными нарушениями вмещающих пород зафиксирована для Пудожгорской интрузии [Онежская..., 2011]. Горизонтальная дайка пикритов в зоне катаклаза гранито-гнейсов отмечена и в докембрийских породах к северу от Печенгской рифтогенной впадины [Морозов и др., 2017].

В целом, по всей видимости, именно системы многоярусных (эшелонированных по вертикали) субгоризонтальных зон дробления и/или брекчирования создают ту «исходную» плоскостную анизотропию пород фундамента, с возникновением которой стало возможным проникновение по этим зонам магмы, т. е. становление горизонтальных даек (см. рис. 7 и 8). По аналогии с ситуацией на Алданском щите можно предположить, что такие зоны представляют собой, по-видимому, зоны дробления *in situ* – без каких-либо смещений и признаков сколовой деформации.

Эти «исходные» зоны дробления и/или брекчирования *in situ* в дальнейшем, уже на стадии внедрения пластовых интрузий (или шире – формирования магматических комплексов, элементом которых являются горизонтальные дайки) могут трансформироваться в зоны сколовой деформации с различной кинематикой: надвиговой со сдвиговой компонентой [Морозов и др., 2017], трещин растяжения и растяжения-сдвига [Stephens et al., 2017], трещин отрыва [Трофимов и др., 2006; Трофимов, Голубев, 2008]. Становление синдеформационных горизонтальных даек в некоторых случаях может также включать механизмы магмо/гидро-разрыва [Howard, 1991; Морозов и др., 2017].

Условия возникновения «исходных» зон дробления и/или брекчирования *in situ* можно оценить, исходя из характерных особенностей этих зон, а также приуроченных к ним горизонтальных даек:

– Эти зоны (и приуроченные к ним горизонтальные дайки) зафиксированы только в ре-

гионах, где по субгоризонтальной поверхности граничат два комплекса пород, резко отличающихся по физико-механическим свойствам и структурно-текстурным характеристикам: гранитоидов и метаморфитов кристаллического фундамента с одной стороны и осадочных (вулканогенно-осадочных) отложений платформенного или субплатформенного чехла с другой.

- Зоны дробления и/или брекчирования (и дайки) распределены в интервале глубин от 0 до 18 км (возможно, и более) от подошвы чехла, но обычно максимальное их число приурочено к глубинам в первые километры.
- Эти зоны (и дайки) сгруппированы в «эшелонированные» по вертикали (многоярусные) полосы протяженностью в десятки и первые сотни километров при мощности единичных зон от первых метров до первых сотен метров.
- Установлено, что на участках, где к моменту формирования зон дробления и становления приуроченных к ним пластовых интрузий поверхность контакта фундамент-чехол была деформирована (конседиментационным прогибанием), зоны дробления и интрузии в фундаменте ориентированы параллельно этой неровной подошве чехольных отложений.
- Отсутствие в «сухих» зонах дробления и/или брекчирования каких-либо признаков смещения (и по контактам зон, и между обломками) и каких-либо деформационных плоскостных структур не позволяет связывать возникновение этих зон со сколовой деформацией и свидетельствует об «объемном» дроблении/брекчировании *in situ* пород в таких зонах.
- В геологической истории возникновение зон дробления, вмещающих горизонтальные дайки, прослеживается от палеопротерозоя до палеогена. При этом интервал времени от начала накопления отложений чехла (т. е. от «момента» появления поверхности раздела резко различных по свойствам комплексов пород) до этапа образования зон дробления и становления горизонтальных даек может быть различным: где-то они возникают еще во время накопления отложений низов разреза чехла, а где-то отстоят от начала формирования чехольного комплекса на сотни миллионов лет.
- Оценить длительность самого этапа образования зон дробления и последующего становления горизонтальных даек («этапа силлогенеза») практически невозможно.

Можно только предположить, что этот этап, по крайней мере в некоторых регионах, был весьма непродолжительным – если, как в Финляндии, длительность эпизода GWA-магматизма, к которому относится формирование горизонтальных даек района Коли, меньше, чем «разрешающая способность» методов датирования.

- «Силлогенез», включая предварительное формирование зон дробления и/или брекчирования, нельзя соотнести с какой-либо определенной (специфической) региональной геодинамической обстановкой – он производит впечатление «космополитичного» процесса и может быть проявлен и на фоне длительного тектонически спокойного прогибания с накоплением отложений платформенного (протоплатформенного) чехла, и в обстановке регионального рифтинга и спрединга, и в эпоху мощной тектоно-магматической активизации платформы.

Механизм возникновения в массивных (не обладающих субгоризонтальной расслоенностью) породах фундамента зон дробления и/или брекчирования *in situ* параллельно контакту фундамент-чехол неясен. По мнению автора, совокупность характеристик зон дробления *in situ* и локализованных в них горизонтальных даек, по всей видимости, указывает на волновой контроль их формирования – как следствие отражения от поверхности раздела двух контрастных по физико-механическим свойствам сред волн упругой деформации. Можно предположить, что при этом в фундаменте возникает поле стоячих волн, динамические характеристики которого (узлы, пучности) определяют локализацию зон дробления *in situ*. В экспериментах [Ильченко, 2012] динамическое воздействие на горную породу в поле стоячих волн приводило к возникновению в узлах стоячих волн (на участках концентрации напряжений) трещин, которые далее растут и сливаются уже в зоны трещиноватости. Моделирование для разреза сверхглубокой Кольской скважины подтвердило волновой контроль геодинамических процессов, с трансформацией упругих колебаний в систему стоячих волн, определяющих тектоническую расслоенность Печенгского блока [Ильченко, 2012]. Суть «объемного» брекчирования/дробления заключается, очевидно, в достаточно резком сбросе напряжений – вариант известного [Горяинов, Давиденко, 1979; Горяинов, 2018] тектоно-кессонного эффекта.

Возникающие подобным образом зоны «дробления *in situ*» оказываются, в ходе дальнейшей геодинамической эволюции, структур-

ными концентраторами напряжений, с одной стороны, и зонами магмо/флюидно/гидротермальной проницаемости, с другой, и могут трансформироваться как в зоны сколовой деформации, так и в проводники магматического материала (с возникновением, в частности, комплекса пластовых интрузий).

С высокой проницаемостью возникающих зон дробления и/или брекчирования *in situ* в фундаменте и гомологичных им послойных тектонических зон в стратифицированных породах чехла связан еще один, не рассматриваемый здесь, аспект проблемы геологического значения границы фундамент-чехол – металлогенический. С пластовыми интрузиями диабазов на юго-западе США [Howard, 1991] связаны месторождения урана, асбеста, магнетита, с Пудожгорской интрузией в Прионежье – титаномагнетитовое и благороднометалльное оруденение [Трофимов и др., 2006; Трофимов, Голубев, 2008], а с пластовыми щелочными интрузиями Алданского щита ассоциируют в породах как фундамента, так и чехла многочисленные крупные флюидно-гидротермальные месторождения золота и урана [Леонтьев, 2016]. Не исключено, что в сходной геодинамической обстановке, в зоне контакта фундамент-чехол, возникла и часть интрузивных тел (силлы, дайки, жилы) кимберлитов и лампроитов, в т. ч. алмазонасных, Зимнего Берега Белого моря и Западной Австралии [Mitchell et al., 1991].

Заключение

Анализ геолого-структурной позиции, геодинамической и деформационной обстановки возникновения горизонтальных даек (пластовых интрузий) в различных регионах мира позволил выявить такие их общие особенности, как: неизменную приуроченность к областям с двухъярусным строением (кристаллический фундамент – чехол); распространение их в фундаменте в диапазоне нескольких километров от подошвы чехла; изначально субгоризонтальное залегание – параллельно поверхности контакта фундамент-чехол; группировка в многоярусную систему эшелонированных по вертикали пластин; обычно, видимо, «прерывистое» (четковидное) строение по простиранию; отсутствие четкой связи с каким-либо конкретным типом региональной геодинамической обстановки (своего рода «космополитизм»).

Обязательным условием внедрения горизонтальных даек предлагается считать предварительное возникновение в породах фундамента субгоризонтальной плоскостной анизо-

тропии, наиболее обычной формой которой, по-видимому, являются зоны «объемного» дробления и/или брекчирования *in situ*. Сделано предположение, что формирование подобных зон дробления может контролироваться стоячими волнами, возникающими в фундаменте при отражении волн упругой деформации от поверхности раздела двух контрастных по физико-механическим свойствам сред – кристаллического фундамента и чехла. Механизм «объемного» брекчирования, видимо, заключается в достаточно резком сбросе напряжений (тектонно-кессонный эффект) в таких зонах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-05-00256 А).

Литература

- Ветрин В. Р.* Протерозойские процессы магматизма и метасоматоза в архейских породах фундамента Печенгского палеорифта // Вестник МГТУ. 2007. Т. 10, № 1. С. 116–129.
- Горяинов П. М., Давиденко И. В.* Тектоно-кессонный эффект в массивах горных пород и рудных месторождений – важное явление геодинамики // ДАН СССР. 1979. Т. 247, № 5. С. 1212–1215.
- Горяинов П. М.* Бескорневые энергогенерирующие очаги нерадиоактивной природы в литосфере (тектонно-кессонный эффект и его возможная роль в синтезе углеводородов) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. Т. 15. С. 120–123.
- Ильченко В. Л.* Тектоностратиграфическая модель блока земной коры как колебательной системы (на примере Печенгского блока, Кольский полуостров) // Вестник КНЦ РАН. 2012. № 1. С. 172–177.
- Кулаковский А. Л.* Катаклиз, бластез и неоминерализация в породах Тарыннахского месторождения // Железисто-кремнистые формации докембрия / Ред. Г. Г. Кравченко. М.: Наука, 1979. С. 55–105.
- Леонтьев В. И.* Геолого-генетические закономерности локализации золотого оруденения на месторождении Подголецное (Алданский щит): Дис. ... канд. геол.-минер. наук. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016. 128 с.
- Морозов Ю. А., Галыбин А. Н., Мухамедиев Ш. А., Смутьская А. И.* Тектонический и геомеханический контроль размещения даек и силлоподобных тел в северо-западной части Кольского полуострова // Геотектоника. 2017. № 3. С. 28–60. doi: 10.7868/S0016853X17030079
- Онежская* палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерализация) / Отв. ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 432 с.
- Петров А. Ф.* Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000, серия Бодайбинская. Лист О-50-XVIII и объяснительная записка. М.: Госгеолтехиздат, 1976. 92 с.
- Петров А. Ф.* Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000, серия Бодайбинская. Лист О-50-XVIII и объяснительная записка. М.: Госгеолтехиздат, 1978. 116 с.
- Пржиялковский Е. С., Балуев А. С., Терехов К. Н.* Структурная позиция силлов и даек долеритов в южном борту Баренцевоморского рифта рифейского возраста // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными: Матер. XIV междунар. конф. Петрозаводск, 2008. Ч. 2. С. 124–127.
- Терехов Е. Н., Морозов Ю. А., Смолькин В. Ф., Баянова Т. Б., Серов П. А., Щербакова Т. Ф., Смутьская А. И.* Особенности дайкового магматизма в северном обрамлении Печенгской структуры // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 1. С. 48–63.
- Трофимов Н. Н., Голубев А. И., Смирнова Н. К.* Особенности морфологии и перспективы рудоносности Пудожгорского интрузива // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 72–80.
- Трофимов Н. Н., Голубев А. И.* Пудожгорское благороднометалльное титаномагнетитовое месторождение. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 123 с.
- Турченко С. И.* Металлогенические особенности Печенгской рифтогенной структуры (Кольский геоблок Балтийского щита) // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 2. С. 40–51. doi: 10.17076/geo296
- Хомич В. Г., Борискина Н. Г.* Природа позднепротерозойских рудномагматических систем Алданского щита // Литосфера. 2016. № 2. С. 70–90.
- Eskola P.* On the disintegration of rapakivi // Extrait des Comptes Rendus de la Societe geologique de Finlande. 1930. No. 3. 10 p.
- Hamilton W., Hayes P. T., Calvert R.* Diabase sheets of the Taylor Glacier region, Victoria Land, Antarctica // U. S. Geol. Surv. Prof. Paper. 1965. 456-B. 71 p.
- Hanski E., Huhma H., Vuollo J.* SIMS zircon ages and Nd isotope systematics of the 2.2 Ga mafic intrusions in northern and eastern Finland // Bull. Geol. Soc. Finland. 2010. Vol. 82. P. 31–62.
- Howard K. A.* Intrusion of horizontal dikes: tectonic significance of Middle Proterozoic diabase sheets widespread in the Upper Crust of the Southwestern United States // J. Geophys. Res. 1991. Vol. 96, iss. B7. P. 12461–12478.
- Jerram D. A., Davis G. R., Mock A., Charrier A., Marsh B. D.* Quantifying 3D crystal populations, packing and layering in shallow intrusions: a case study from the Basement sill, Dry valleys, Antarctica // Geosphere. 2010. Vol. 6. P. 537–548.
- Juhlin C.* Interpretation of the reflections in the Siljan Ring area based on results from the Gravberg-1 borehole // Tectonophysics. 1990. Vol. 173. P. 345–360.
- Juhlin C.* Appraisal of geological barriers in the upper crust based on some crystalline rock drilling projects and geophysical data: Focus on Sweden // Final Disposal in Deep Boreholes Using Multiple Geological Barriers: Digging Deeper for safety: Proceed. of the Workshop, Juni 2015. Berlin: GRS gGmbH, 2016. P. 83–106.
- Laajoki K.* Karelian supracrustal rocks // Lehtinen M., Nurmi P. A., Ramo O. T. (Eds.) Precambrian Geology of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield. Amsterdam: Elsevier B. V., 2005. P. 279–342.

Litak R. K., Hauser E. C. Bagdad Reflection Sequence as tabular mafic intrusions: Evidence from seismic modeling of mapped exposures // GSA Bulletin. 1992. Vol. 104(10). P. 1315–1325.

Mandler H. A. F., Clowes R. M. Evidence for extensive tabular intrusions in the Precambrian shield of western Canada: A 160-km-long sequence of bright reflections // Geol. 1997. Vol. 25(3). P. 271–274.

Mandler H. A., Clowes R. M. The HSI bright reflector: Further evidence for extensive magmatism in the Precambrian of western Canada // Tectonophysics. 1998. Vol. 288(1–4). P. 71–81.

Mitchell R. H., Bergman S. C. Description of lamproite: Occurrences, distribution, age, characteristics, and geological framework // Petrology of Lamproites. Ch. 3. New York: Springer Science+Business Media, 1991. P. 39–102.

Muirhead J. D., Airoldi J., Rowland J. V., White J. D. L. Interconnected sills and inclined sheet intrusions control shallow magma transport in the Ferrar large igneous province, Antarctica // Geol. Soc. Am. Bull. 2012. Vol. 124(1–2). P. 162–180.

Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the eastern and northern Finland / Eds. J. I. Vuollo, Zh. A. Fedotov // Dyke swarms – time markers of crustal evolution: Fifth International Dyke Conference (31 July – 3 August 2005, Rovaniemi, Finland). Post-conference Field Trip. Guidebook: Eastern and Northern Finland – Belomoride Mobile Belt and Kola Peninsula. Part 1. 2005. 84 p.

Papasikas N., Juhlin C. Interpretation of reflections from the central part of the Siljan ring impact structure based on results from the Stenberg-1 borehole // Tectonophysics. 1997. Vol. 269, no. 3–4. P. 237–245.

Pekkarinen L. J., Lukkarinen H. Paleoproterozoic volcanism in the Kiihtelysvaara – Tohmajärvi district, eastern Finland // Geol. Survey of Finland. 1991. Bull. 357. 30 p.

References

Goryainov P. M., Davidenko I. V. Tektono-kessonnyi effekt v massivakh gornyykh porod i rudnykh mestorozhdenii – vazhnoe yavlenie geodinamiki [The tectonic-caisson effect in rock massifs and ore deposits is an important phenomenon of geodynamics]. DAN SSSR [Proceed. Acad. Sci. USSR]. 1979. Vol. 247, no. 5. P. 1212–1215.

Goryainov P. M. Beskornevye energogeneriruyushchie ochagi neradioaktivnoi prirody v litosfere (tektono-kessonnyi effekt i ego vozmozhnaya rol' v sinteze uglevodorodov) [Rootless energy generating foci of non-radioactive substitutions in the lithosphere (tectonic-caisson effect and its possible role in the synthesis of hydrocarbons)]. Trudy Fersmanovskoi nauch. sessii GI KNTs RAN [Proceed. Fersman sci. session GI KSC RAS]. 2018. Vol. 15. P. 120–123.

Il'chenko V. L. Tektonostratigraficheskaya model' bloka zemnoi kory kak kolebatel'noi sistemy (na primere Pechengskogo bloka, Kol'skii poluostrov) [Tectonostratigraphic model of the block of the earth's crust as an oscillation system (on the example of the Pechenga block, Kola Peninsula)]. Vestnik KNTs RAN [Vestnik KolSC RAS]. 2012. No. 1. P. 172–177.

Ross G. M., Eaton D. W. Winagami reflection sequence: Seismic evidence for postcollisional magmatism in the Proterozoic of western Canada // Geology. 1997. Vol. 25. P. 199–202.

Sorjonen-Ward P. Structural and hydrothermal event history of the Koli-Kaltimo-Eno region – a preliminary regional framework // GTK Report CM 60/2006/3. 16 p.

Stephens T. L., Walker R. J., Healy D., Bubeck A., England R. W., McCaffrey K. J. W. Igneous sills record far-field and near-field stress interactions during volcano construction: Isle of Mull, Scotland // Earth and Planetary Science Letters. 2017. Vol. 478. P. 159–174.

Vuollo J., Piirainen T. The 2.2 Ga old Koli layered sill: The low-Al tholeiitic (karjalitic) magma type and its differentiation in northern Karelia, eastern Finland // Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar. 1992. Vol. 114(1). P. 131–142. doi: 10.1080/11035899209453466

Welford J. K., Clowes R. M. Deep 3-D seismic reflection imaging of Precambrian sills in southwestern Alberta, Canada // Tectonophysics. 2004. Vol. 388. P. 161–172.

Welford J. K., Clowes R. M. Three-dimensional seismic reflection investigation of the upper crustal Winagami sill complex of northwestern Alberta, Canada // Geophys. J. Int. 2006. Vol. 166. P. 155–169.

Welford J. K., Hearn E. H., Clowes R. M. Possible role of midcrustal igneous sheet intrusions in cratonic arch formation // Tectonics. 2007. Vol. 26(5). TC 5012. doi: 10.1029/2006TC002023

Welin E., Lundqvist T. New Rb-Sr Age Data for the Sub-Jotnian Volcanics (Dala Porphyries) in the Los-Hamra Region, Central Sweden // Geologiska Foereningen i Stockholm. Foerhandlingar. 1970. Vol. 92(1). P. 35–39.

Поступила в редакцию 26.05.2021

Khomich V. G., Boriskina N. G. Priroda pozdnemezozoiskikh rudnomagmatischenkikh sistem Aldanskogo shchita [The nature of the Late-Mesozoic ore-magmatic systems of the Aldan Shield]. Litosfera [Lithosphere]. 2016. No. 2. P. 70–90.

Kulakovskii A. L. Kataklaz, blastez i neomineralizatsiya v porodakh Tarynnakhskogo mestorozhdeniya [Cataclase, blastez and neomineralization in the rocks of the Tarynnakh deposit]. Zhelezisto-kremnistye formatsii dokembriya [Precambrian BIF]. Ed. G. G. Kravchenko. Moscow: Nauka, 1979. P. 55–105.

Leont'ev V. I. Geologo-geneticheskie zakonomernosti lokalizatsii zolotogo orudneniya na mestorozhdenii Podgolechnoe (Aldanskii shchit) [Geological and genetic patterns of the localization of gold mineralization at the Podgolechnoe deposit (Aldan Shield)]: PhD (Cand. of Geol.-Miner.) thesis. St. Petersburg: VSEGEI, 2016. 128 p.

Morozov Yu. A., Galybin A. N., Mukhamediev Sh. A., Smul'skaya A. I. Tektonicheskii i geomekhanicheskii kontrol' razmeshcheniya daek i sillopodobnykh tel v severo-zapadnoi chasti Kol'skogo poluostrova [Tectonic and geomechanical control of the placement of dykes

and silllike bodies in the northwestern part of the Kola Peninsula]. *Geotektonika* [Geotectonics]. 2017. No. 3. P. 28–60. doi: 10.7868/S0016853X17030079

Oneshskaya paleoproterozoiskaya struktura (geologiya, tektonika, glubinnoe stroenie i minerageniya) [Onega Paleoproterozoic structure (geology, tectonics, deep structure and minerageny)]. Eds. L. V. Glushanin, N. V. Sharov, V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2011. 432 p.

Petrov A. F. Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200 000, seriya Bodaibinskaya. List O-50-XVII i ob'yasnitel'naya zapiska [Geological map of the USSR. Scale 1: 200,000, Bodaibo series, O-50-XVII sheet and an explanatory note]. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1976. 92 p.

Petrov A. F. Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200 000, seriya Bodaibinskaya. List O-50-XVIII i ob'yasnitel'naya zapiska [Geological map of the USSR. Scale 1:200,000, Bodaybo series, O-50-XVIII sheet and an explanatory note]. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1978. 116 p.

Przhiyalkovskii E. S., Baluev A. S., Terekhov K. N. Strukturnaya pozitsiya sillov i daek doleritov v yuzhnom bortu Barentsevomorskogo rifta rifeiskogo vozrasta [The structural position of dolerite sills and dykes in the southern board of the Riphean Barents Sea rift]. *Svyaz' poverkhnostnykh struktur zemnoi kory s glubinnymi: Mater. XIV mezhdunar. konf.* [The connection of the surface structures of the earth's crust with the deep ones. Proceed. XIV int. conf.]. Petrozavodsk, 2008. Pt. 2. P. 124–127.

Terekhov E. N., Morozov Yu. A., Smol'kin V. F., Bayanova T. B., Serov P. A., Shcherbakova T. F., Smul'skaya A. I. Osobennosti daikovogo magmatizma v severnom obramlenii Pechengskoi struktury [Features of dyke magmatism in the northern framing of the Pechenga structure]. *Vestnik MGTU* [Bull. Murmansk St. Tech. Univ.]. 2019. Vol. 22, no. 1. P. 48–63.

Trofimov N. N., Golubev A. I., Smirnova N. K. Osobennosti morfologii i perspektivy rudnosnosti Pudozhgorskogo intruziva [Features of morphology and perspectives of ore content of the Pudozhgorsk intrusive]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and mineral resources of Karelia]. Iss. 9. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2006. P. 72–80.

Trofimov N. N., Golubev A. I. Pudozhgorskoe blagorodnometall'noe titanomagnetitovoe mestorozhdenie [Pudozhgorsk noble-metal titanium-magnetite deposit]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2008. 123 p.

Turchenko S. I. Metallogenicheskie osobennosti Pechengskoi riftogennoi struktury (Kol'skii geoblok Baltiiskogo shchita) [The metallogenic features of the Pechenga rift structure (Kola geoblock of the Baltic Shield)]. *Trudy KarNTs RAN* [Transactions of KarRC RAS]. 2016. No. 2. P. 40–51. doi: 10.17076/geo296

Vetrin V. R. Proterozoiskie protsessy magmatizma i metasomatoza v arkhaiskikh porodakh fundamenta Pechengskogo paleorifta [Proterozoic processes of magmatism and metasomatism in the Archean rocks of the basement of the Pechenga paleorift]. *Vestnik MGTU* [Bull. MSTU]. 2007. Vol. 10, no. 1. P. 116–129.

Eskola P. On the disintegration of rapakivi. *Extrait des Comptes Rendus de la Societe geologique de Finlande*. 1930. No. 3. 10 p.

Hamilton W., Hayes P. T., Calvert R. Diabase sheets of the Taylor Glacier region, Victoria Land, Antarctica. *U. S. Geol. Surv. Prof. Paper*. 1965. 456-B. 71 p.

Hanski E., Huhma H., Vuollo J. SIMS zircon ages and Nd isotope systematics of the 2.2 Ga mafic intrusions in northern and eastern Finland. *Bull. Geol. Soc. Finland*. 2010. Vol. 82. P. 31–62.

Howard K. A. Intrusion of horizontal dikes: tectonic significance of Middle Proterozoic diabase sheets widespread in the Upper Crust of the Southwestern United States. *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96, iss. B7. P. 12461–12478.

Jerram D. A., Davis G. R., Mock A., Charrier A., Marsh B. D. Quantifying 3D crystal populations, packing and layering in shallow intrusions: a case study from the Basement sill, Dry valleys, Antarctica. *Geosphere*. 2010. Vol. 6. P. 537–548.

Juhlin C. Interpretation of the reflections in the Siljan Ring area based on results from the Gravberg-1 borehole. *Tectonophysics*. 1990. Vol. 173. P. 345–360.

Juhlin C. Appraisal of geological barriers in the upper crust based on some crystalline rock drilling projects and geophysical data: Focus on Sweden. *Final Disposal in Deep Boreholes Using Multiple Geological Barriers: Digging Deeper for safety*: Proceed. of the Workshop, Juni 2015. Berlin: GRS gGmbH, 2016. P. 83–106.

Laajoki K. Karelian supracrustal rocks. *Lehtinen M., Nurmi P. A., Ramo O. T.* (eds.) *Precambrian Geol. of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield*. Amsterdam: Elsevier B. V., 2005. P. 279–342.

Litak R. K., Hauser E. C. Bagdad Reflection Sequence as tabular mafic intrusions: Evidence from seismic modeling of mapped exposures. *GSA Bulletin*. 1992. Vol. 104(10). P. 1315–1325.

Mandler H. A. F., Clowes R. M. Evidence for extensive tabular intrusions in the Precambrian shield of western Canada: A 160-km-long sequence of bright reflections. *Geology*. 1997. Vol. 25(3). P. 271–274.

Mandler H. A., Clowes R. M. The HSI bright reflector: Further evidence for extensive magmatism in the Precambrian of western Canada. *Tectonophysics*. 1998. Vol. 288(1–4). P. 71–81.

Mitchell R. H., Bergman S. C. Description of lamproite: Occurrences, distribution, age, characteristics, and geological framework. *Petrology of Lamproites*. Ch. 3. New York: Springer Science+Business Media, 1991. P. 39–102.

Muirhead J. D., Airoldi J., Rowland J. V., White J. D. L. Interconnected sills and inclined sheet intrusions control shallow magma transport in the Ferrar large igneous province, Antarctica. *Geol. Soc. Am. Bull.* 2012. Vol. 124(1–2). P. 162–180.

Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the eastern and northern Finland. Eds. J. I. Vuollo, Zh. A. Fedotov. Dyke swarms – time markers of crustal evolution: Fifth International Dyke Conference (31 July – 3 August 2005, Rovaniemi, Finland). Post-conference Field Trip. Guidebook: Eastern and Northern Finland – Belomoride Mobile Belt and Kola Peninsula. Part 1. 2005. 84 p.

Papasikas N., Juhlin C. Interpretation of reflections from the central part of the Siljan ring impact structure based on results from the Stenberg-1 borehole. *Tectonophysics*. 1997. Vol. 269, no. 3–4. P. 237–245.

Pekkarinen L. J., Lukkarinen H. Paleoproterozoic volcanism in the Kiihtelysvaara – Tohmajärvi district, eastern Finland. *Geol. Survey of Finland*. 1991. Bull. 357. 30 p.

Ross G. M., Eaton D. W. Winagami reflection sequence: Seismic evidence for postcollisional magmatism in the Proterozoic of western Canada. *Geology*. 1997. Vol. 25. P. 199–202.

Sorjonen-Ward P. Structural and hydrothermal event history of the Koli-Kaltimo-Eno region – a preliminary regional framework. *GTK Report CM 60/2006/3*. 16 p.

Stephens T. L., Walker R. J., Healy D., Bubeck A., England R. W., McCaffrey K. J. W. Igneous sills record far-field and near-field stress interactions during volcano construction: Isle of Mull, Scotland. *Earth and Planetary Science Letters*. 2017. Vol. 478. P. 159–174.

Vuollo J., Piirainen T. The 2.2 Ga old Koli layered sill: The low-Al tholeiitic (karjalitic) magma type and its differentiation in northern Karelia, eastern Finland. *Geologiska Föreningen i Stockholm*

Förhandlingar. 1992. Vol. 114(1). P. 131–142. doi: 10.1080/11035899209453466

Welford J. K., Clowes R. M. Deep 3-D seismic reflection imaging of Precambrian sills in southwestern Alberta, Canada. *Tectonophysics*. 2004. Vol. 388. P. 161–172.

Welford J. K., Clowes R. M. Three-dimensional seismic reflection investigation of the upper crustal Winagami sill complex of northwestern Alberta, Canada. *Geophys. J. Int.* 2006. Vol. 166. P. 155–169.

Welford J. K., Hearn E. H., Clowes R. M. Possible role of midcrustal igneous sheet intrusions in cratonic arch formation. *Tectonics*. 2007. Vol. 26(5). TC 5012. doi: 10.1029/2006TC002023

Welin E., Lundqvist T. New Rb-Sr Age Data for the Sub-Jotnian Volcanics (Dala Porphyries) in the Los-Hamra Region, Central Sweden // *Geologiska Föreningen i Stockholm. Förhandlingar*. 1970. Vol. 92(1). P. 35–39.

Received May 26, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Кулаковский Алексей Львович

старший научный сотрудник
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН
ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, Россия, 123242
эл. почта: akulakovskij@mail.ru

CONTRIBUTOR:

Kulakovskiy, Aleksey

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy
of Sciences
10, bldg. 1, Bolshaya Gruzinskaya St., 123242 Moscow, Russia
e-mail: akulakovskij@mail.ru