

Мобильно-проницаемые зоны в фундаменте северо-восточной части Балтийского щита и условия их локализации

© В. Т. Филатова, 2012

Геологический институт Кольского научного центра РАН,
Апатиты, Россия

Поступила 8 июня 2011 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

На прикладі Кольського регіону виконано тектонофізичне моделювання, що дало змогу виділити структури, які дрениють підняття мантіїних основних—ультраосновних магм. Дослідження здійснено на основі числового моделювання з метою реконструкції зон підвищеної проникності фундаменту, які сформувались у пізньому архейі та зумовили локалізацію тектономагматичних процесів у регіоні. Побудовано кількісні моделі напружено-деформованого стану земної кори регіону з урахуванням її еволюційного розвитку. Північно-східну частину Балтійського щита розглянуто як неоднорідне пружне тіло, що зазнає дії об'ємних сил і заданих напружень на межі. Розв'язано крайову задачу в напруженнях. Уперше запропоновано використовувати розрахунки градієнтних полів напружень для виділення ослаблених зон у фундаменті. Розглянуто два етапи архейського періоду розвитку Кольського регіону. Згідно з аналізом результатів числового експерименту, закладення ослаблених зон у фундаменті Кольського мегаблока, які визначили місцезоположення зеленокам'яних поясів Колмозеро-Воронья і Терсько-Аллареченський, відбулося раніше, ніж у північній частині Біломорського мегаблока, яка охоплює територію поширення Йонського зеленокам'яного поясу. Розроблені методи можуть бути застосовані як методи експрес-діагностики, що дає змогу виділяти ослаблені зони у фундаменті та оцінювати їх ступінь проникності з мінімальними витратами часу й ресурсів.

On the example of the Kola region tectonophysical simulation has been performed, which provided discrimination of the structures draining the uplift of mantle basic-ultrabasic magmas. The research has been carried out on the basis of numerical simulation to reconstruct the zones of high permeability of the basement, which were formed in the Late Archean and predetermined the localization of tectonic magmatic processes in the region. For this purpose, quantitative models have been plotted of the strained-deformed state of the Earth's crust of the region taking into consideration its evolutionary development. The northeastern part of the Baltic Shield is treated as a non-uniform elastic body affected by volume forces and stresses specified at the boundary. The boundary value problem has been solved in terms of stresses. For the first time it is proposed to apply calculations of gradient stress fields to identify weakened zones in the basement. Two stages of the Archean period in the Kola region have been considered. Analysis of the results of numerical experiment conducted shows that the inception of the weakened zones in the Kola megablock basement, which predetermined location of the Kolmozero-Voronja and Tersky- Allarechka greenstone belts, occurred earlier than in the northern part of the Belomorian megablock involving the area of the Yona greenstone belt distribution. The methods elaborated can be applied as the ones of a rapid diagnosis to allocate the weakened zones in the basement and evaluate their permeability degree with the minimum time and resources required.

Введение. Северо-восточная часть Балтийского щита характеризуется длительной и сложной историей развития, а наблюдаемая струк-

тура отражает суммарный эффект многократных преобразований. Отмечается неравномерное развитие земной коры региона, которое

объясняется последовательной сменой во времени и пространстве совокупности эндогенных геологических процессов — тектонических, магматических, метаморфических [Загородный, Радченко, 1983; Петров и др., 1986; Радченко и др., 1992; Mitrofanov et al., 1995]. Имеющиеся изотопные датировки пород архейского фундамента укладываются в интервал 3115—2550 млн лет [Kroner, Compston, 1990; Баянова и др., 2002]. Признается, что основная масса земной коры Кольского региона сформировалась в позднем архее [Загородный, Радченко, 1983; Вревский, 1989; Радченко и др., 1992; Митрофанов, 2001]. Комплекс древнейшего фундамента (ранний архей) однороден по составу, залегает в основании более молодых образований и имеет купольно-блоковую структуру [Загородный, Радченко, 1983]. Данных о тектоническом режиме формирования древнейшего фундамента практически нет. Не исключается латеральная неоднородность структурно-вещественного комплекса фундамента региона, которая обеспечила гетерогенность его строения [Загородный, Радченко, 1983]. Следует отметить, что дифференциация литосферы при ее становлении и эволюции допускается и для более крупных регионов, чем Кольский [Глебовицкий и др., 1980]. Вопросы эволюции земной коры региона в раннем докембрии до сих пор остаются одними из самых дискуссионных.

В строении земной коры наиболее заметно отражены три крупных корообразующих процесса, два из которых имели место в архее, третий — в раннем протерозое. Наиболее ранний корообразующий процесс (саамский) сформировал сиалическую кору региона, и процесс становления земной коры завершился раннеархейской стабилизацией [Загородный, Радченко, 1983]. В позднем архее область была вновь подвержена действию корообразующих процессов. Характерными структурами на тот период были мобильно-проницаемые зоны, образовавшие зеленокаменные пояса [Вревский, 1980, 1989]. В интервале 2,90—2,6 млрд лет назад земная кора региона повсеместно претерпела интенсивную складчатость, метаморфизм, гранитизацию и была повторно консолидирована. Архейские комплексы Кольского региона подверглись региональному метаморфизму в диапазоне от низкотемпературной амфиболитовой до гранулитовой фации [Петров и др., 1986]. Термодинамические условия регионального метаморфизма оцениваются в интервале 500—850 °C и 400—600 МПа.

В раннем протерозое (2,55—1,6 млрд лет назад) в результате неравномерно проявленных деструктивных процессов, блоковых движений и неоднократной смены условий сжатия—растяжения земной коры имела место зональная перестройка структурного плана архейского фундамента и были сформированы интракратонные рифтогенные и субплатформенные структуры карелид. Таким образом, окончательно сформировался структурный план региона и произошла кратонизация земной коры. В последующие эпохи значительных геолого-тектонических процессов регион не переживал. Большинство из известных продуктивных мафит-ультрамафитовых массивов обнаруживает пространственно-временную связь с зонами глубинных долгоживущих разломов и рифтогенеза.

В северо-восточной части Балтийского щита традиционно выделяются наиболее крупные архейские структуры, ограниченные зонами долгоживущих тектонических разломов, которые рассматриваются в ранге мегаблоков: Мурманский, Кольский, Беломорский и Карельский [Mitrofanov et al., 1995] (рис. 1). Из второстепенных структур по особенностям строения и состава пород выделена архейская Кейвская структура, вложенная в структуру Кольского мегаблока. Кроме того, отмечаются следующие структурные зоны: архейские зеленокаменные пояса Колмозеро-Воронья, Ёнский и Терско-Аллареченский, протерозойские Лапландский гранулитовый пояс и Печенга-Имандра-Варзугский палеорифтоген, а также гигантские палеозойские щелочные массивы (Хибинский, Ловозерский). На рубеже архей—протерозой происходит заложение первых линейных рифтогенных вулканотектонических депрессий на стабильной коре континентального типа, т. е. длительный период ее стабильного состояния сменяется периодом интенсивной перестройки земной коры региона. При этом раннепротерозойский Печенга-Имандра-Варзугский рифтогенный пояс частично накладывается на область развития архейского Терско-Аллареченского пояса.

При реконструкции геодинамических режимов, определивших особенности развития Кольского региона и повлиявших на его металлогеническую специализацию, несомненно, особо значимой задачей является конкретизация механизмов, вызывающих тектонические деформации. Тектонический режим формирования архейского фундамента региона исследователями описывается только в общих

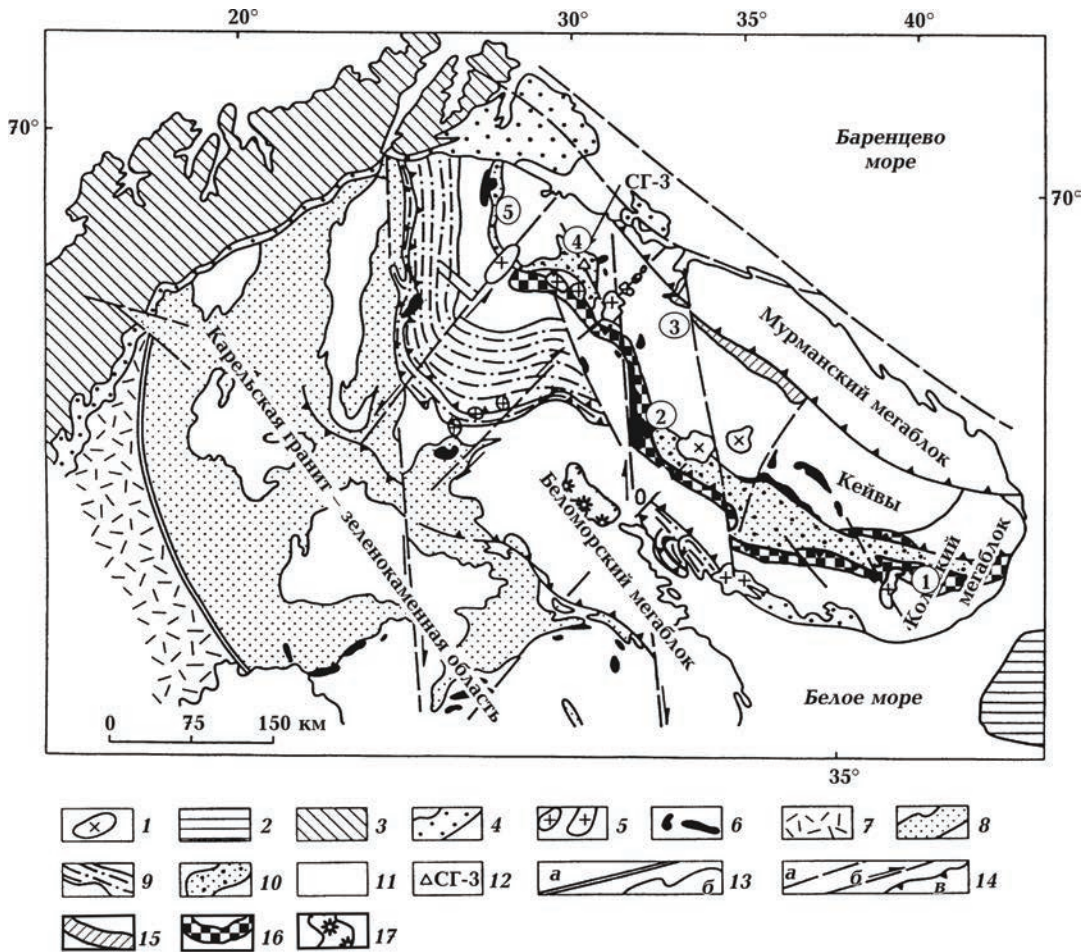


Рис. 1. Схема размещения основных структур северо-восточной части Балтийского щита, по работам [Геологическая ..., 1996; Шаров и др., 1997]. Палеозой: 1 — щелочные интрузивы, 2 — платформенный чехол, 3 — каледониды Норвегии; 4 — осадочные формации позднего протерозоя; ранний протерозой: 5 — гранитные плутоны, 6 — массивы основных и ультраосновных пород; осадочно-вулканогенные комплексы: 7 — свекофениды, 8 — карелиды; 9 — Лапландский гранулитовый пояс; 10 — пояс Печенга-Имандра-Варзугский; 11 — гранито-гнейсовый фундамент протерозойских структур; 12 — расположение Кольской сверхглубокой скважины; 13 — геологические границы (а — щита, б — подчиненных структур); 14 — разрывные нарушения (а — разломы неопределенного характера, б — сдвиги, в — надвиги); архейские вулканогенно-осадочные комплексы зеленокаменных поясов: 15 — Колмозеро-Воронья, 16 — Терско-Аллареченский, 17 — Ёнский; районы (цифры в кружках): 1 — Терский, 2 — Приимандровский (Воче-Ламбинский), 3 — Заимандровский (Оленегорский), 4 — Аллареченский, 5 — Каскамский.

чертах [Радченко и др., 1992]. Мобильно-проницаемые зоны рассматриваются как структуры, обладающие наибольшей проницаемостью для глубинных магматических расплавов [Земная ..., 1978]. В этих зонах отмечаются следы тектонических движений на всех активных этапах развития земной коры региона. Одна из важнейших характеристик тектоносферы — напряженно-деформированное состояние, контролирующее развитие текто-

нических и геодинамических процессов в коре. Выполненные ранее исследования (тектоническое моделирование) позволили в целом охарактеризовать напряженно-деформированное состояние коры региона в позднем архее и впервые выявили взаимосвязь между действующими в регионе природными напряжениями и формированием в фундаменте ослабленных зон [Филатова, 2009а, б]. Показано, что в случае всестороннего равномер-

ного тектонического сжатия региона в градиентных полях напряжений наиболее отчетливо выделяются структуры, обусловленные развитием проницаемых зон земной коры. При этом полученные результаты свидетельствуют о том, что возникающие в земной коре напряжения могут создавать благоприятные условия для развития разрывных нарушений в пределах жестких блоков. Цель настоящих исследований — выделение главных архейских магмовыводящих зон и объяснение механизмов их заложения.

Представляемая работа, выполненная на базе численного моделирования, позволила проанализировать тектонофизическую обстановку, сформировавшуюся в Кольском регионе в позднем архее, и выявить ослабленные зоны в фундаменте, предопределившие локализацию тектономагматических процессов. Для выделения возможных архейских магмовыводящих зон в земной коре региона и последующего анализа их соотношений с раннепротерозойскими зонами магматизма и метаморфизма было выполнено тектонофизическое моделирование. В статье приводятся результаты реконструкции магмовыводящих зон, формирование которых имело место в позднем архее. Для этого были построены количественные модели напряженно-деформированного состояния земной коры региона с учетом ее эволюционного развития и определены структуры, дренирующие подъем мантийных основных—ультраосновных магм. Проведенные исследования продемонстрировали унаследованность положения магмопроводящих структур региона от архея до раннего протерозоя. В целях выделения ослабленных зон в фундаменте, предопределивших локализацию магматических процессов, впервые предлагается использовать расчеты градиентных полей напряжений.

Методика исследования. Выполненные ранее исследования применительно к Кольскому региону [Филатова, 2002, 2009а, б] позволяют принять следующие допущения: а) тип тектономагматической активности, установившийся в северо-восточной части Балтийского щита в раннем докембрии, был внутриплитный; б) северо-восточная часть Балтийского щита на весь период геологической истории региона представляла собой неоднородное упругое тело, подверженное действию объемных сил и заданных напряжений на его границе; в) конфигурация контактных границ между архейскими мегаблоками на протяжении

всей геологической истории кардинально не изменялась; г) Кольский регион на протяжении позднего архея находился в стабильном состоянии, преимущественно, в условиях всестороннего равномерного сжатия вследствие действия удаленных сил.

Допускаем, что исследуемая область находится в состоянии равновесия и компоненты тензора напряжений σ_{ij} в случае плоской задачи удовлетворяют условиям равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \beta_x = 0,$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \beta_y = 0,$$

где β_x и β_y — объемные силы.

При решении поставленной задачи были рассмотрены два этапа архейского периода развития Кольского региона, и, соответственно, на каждом этапе задавалась определенная базовая модель, описывающая исследуемую область с учетом сформировавшихся к тому времени геологических структур. *Первый этап*: базовая модель включает структурные элементы фундамента, окончательно оформившиеся после раннеархейской стабилизации земной коры региона; в качестве подобластей используются архейские мегаблоки (Мурманский, Кольский, Беломорский и Карельский), Кейвская структура, а также разломные зоны (мощность 25—30 км), разъединяющие мегаблоки; временной интервал — 3,0—2,8 млрд лет назад (мезоархей). *Второй этап*: исходная базовая модель дополняется подобластями, включающими территории развития зеленокаменных поясов Колмозеро-Воронья и Терско-Алареченский; интервал — 2,8—2,5 (2,55) млрд лет назад (неоархей). Для каждой базовой модели рассчитывалась модель напряженно-деформированного состояния коры. Все работы выполнялись в масштабе 1 : 1 000 000 с использованием исходной геологической карты масштаба 1 : 500 000 [Геологическая ..., 1996]. При выборе каждой базовой модели, аппроксимирующей тектоническую структуру региона, учитывались имеющиеся геохронологические данные по региону.

Таким образом, на каждом этапе исследований рассматриваемая область включала несколько подобластей, каждая из них считается однородной изотропной и линейно-упругой с линейно-упругими постоянными: коэф-

фициент Пуассона (μ) и модуль Юнга (E). На границах подобластей предполагается жесткое сцепление, имеет место непрерывность нормальных напряжений и смещений, а также отсутствие разрывов сплошности. При моделировании решалась краевая задача в напряжениях с использованием метода граничных элементов [Крауч, Старфилд, 1987], который обеспечивает достаточно гибкий аппарат для решения поставленных задач. Весь процесс численного решения задач алгоритмизирован и заложен в основу разработанных пакетов программ для ЭВМ [Филатова, 2002, 2009а, б]. Для архейских мегаблоков (Карельский, Мурманский, Кольский, Беломорский) и Кейвской структуры при расчетах значение коэффициента принималось равным: $\mu = 0,25$ [Справочник ..., 1975; Сейсмичность ..., 2002], для ослабленных (разломных) зон (согласно имеющимся экспериментальным данным [Вавакин, Салганик, 1975]) $\mu = 0,3$. Земная кора гетерогенна, и, следовательно, каждый блок включает в себя различные горные породы с присущими им физическими свойствами. Модуль Юнга в каждой подобласти определялся как средневзвешенное значение [Филатова, 2009а]: Карельский, Мурманский, Кольский и Беломорский мегаблоки — $E = 6,2 \cdot 10^4$ МПа, Кейвская структура — $E = 5,8 \cdot 10^4$ МПа. Для ослабленных (разломных) зон значение модуля Юнга задаем на порядок меньше [Сейсмичность ..., 2002]. Области развития зеленокаменных поясов Колмозеро-Воронья и Терско-Аллареченский можно рассматривать как ослабленные зоны, так как они представляют собой мобильно-проницаемые структуры.

Согласно принятому допущению, что регион в позднем архее находился в условиях всестороннего равномерного сжатия, по всему периметру выделенной области задается нагрузка T таким образом, как показано ранее в работе [Филатова, 2009а]. Следовательно, допускается, что на границе область всюду подвержена действию одинакового нормального напряжения $(\sigma_n^i)_0 = T$, при этом касательное напряжение $(\sigma_s^i)_0 = 0$. Величины $(\sigma_n^i)_0$ и $(\sigma_s^i)_0$ определяют известные граничные значения компонент усилий. Поскольку нет достоверных данных об абсолютной величине действовавших сил в регионе, их интенсивность T принимаем равной единице, а при расчетах получены величины напряжений в единицах T . На поверхности контакта подобластей задавались условия непре-

рывности усилий. В итоге построена система линейных алгебраических уравнений с $2N$ неизвестными. При этом использовались предварительно полученные аналитические решения для простых сингулярных задач [Крауч, Старфилд, 1987] таким образом, чтобы удовлетворять заданным граничным условиям на каждом элементе контура. Выполненные модельные расчеты на примерах, для которых есть точное аналитическое решение (см. работу [Мухелишвили, 1966]), показали, что из всех методов граничных элементов наиболее оптимальное решение для составных задач дает метод фиктивных нагрузок. Наиболее успешно система уравнений решается методом ортогонализации (ортогонализация по строкам). Получаемые количественные оценки напряжений $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ позволяют рассчитать градиентные поля напряжений в виде $Gr = \left| (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) / T \right|$ и определить ориентацию осей главных напряжений по формуле [Мухелишвили, 1966] $\operatorname{tg} 2\theta = 2\sigma_{xy} / (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})$, где θ — угол, который составляет ось главного напряжения σ_1 с осью OX .

Объяснение механизмов возникновения нагрузки T , действующей по периметру области и создающей условия всестороннего равномерного сжатия, может быть следующим. Во-первых, это продолжение аккреции земной коры огромного региона и один из его сегментов (северо-восточная часть Балтийского щита) уже представлял собой сформировавшуюся единую континентальную плиту, испытывающую со всех сторон давление соседних миниплит. Во-вторых, при стабилизации земной коры может сказаться гравитационное растекание пород окружавших регион геоблоков, которые могли быть более плотными или большей мощности. Силы, вызванные разностью гравитационного потенциала, могут играть преобладающую роль при формировании региональных полей напряжений [Coblentz et al., 1994]. Авторы работы [Коптев, Ершов, 2010] по результатам выполненного моделирования также делают вывод, что формирование полей напряжений в литосфере, в основном, обусловлено силами разности гравитационного потенциала. Таким образом, приведенные факторы вполне могут быть использованы при объяснении причин генерации глобальных полей напряжений в земной коре региона.

Обсуждение результатов и выводы. Выполненное численное моделирование позволило для каждой базовой модели оценить величины напряжений $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ градиен-

тов напряжений и определить ориентацию осей главных напряжений, которые могли возникать в континентальной плите северо-востока Балтийского щита в позднем архее под воздействием внешних тектонических сил. На рис. 2 представлена ориентация осей главных напряжений (σ_1), полученных для первой базовой модели (возрастной интервал 3,0—2,8 млрд лет). В целом наблюдается сложная картина и характер ориентации осей σ_1 для каждого мегаблока различен. Например, в пределах Мурманского мегаблока (рис. 2) по конфигурации осей σ_1 можно обозначить три верные структуры, которые по местоположению коррелируются с блоками, выделенными по значениям термодинамических параметров метаморфизма супракрустальных комплексов и показанными на схеме размещения фаций метаморфизма позднеархейского периода в работе [Эволюция ..., 1987]. Кроме того, при-

ближенная корреляция имеет место при рассмотрении схемы районирования фундамента Мурманского мегаблока по характеру размещения гранитоидов разных фаций глубинности в современном эрозионном срезе, представленной в работе [Загородный, Радченко, 1983]. В пределах Кольского мегаблока ориентация осей главных напряжений σ_1 в его осевой части, в основном, совпадает с простиранием Терско-Аллареченского пояса. Для Беломорского мегаблока и Кейвской структуры наблюдается еще более сложная картина. Для центральной части Кейвской структуры характерны сжатие в субмеридиональном направлении (северо-восточно-северное направление) и растяжение в субширотном. Одновременно в северной части структуры (рис. 2) выделяется узкая полоса, испытывающая локальное растяжение вкост простирания и перекрывающая область развития пород песцо-

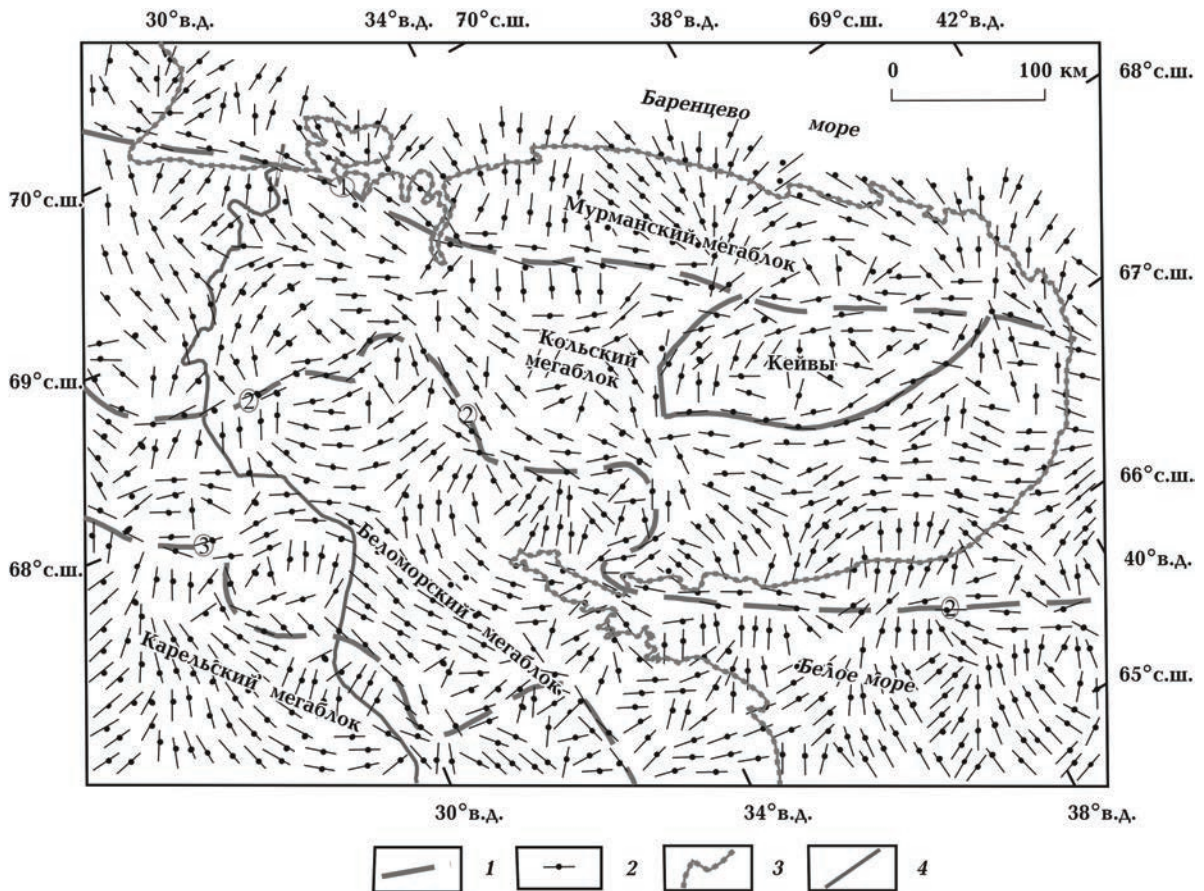


Рис. 2. Ориентация осей главных напряжений в пределах земной коры северо-восточной части Балтийского щита в архее (временной интервал — 3,0—2,8 млрд лет назад): 1 — разломы (зоны разломов) на контакте мегаблоков; 2 — ось наибольшего сжатия; 3 — современная береговая линия; 4 — государственная граница России.

вотундровской толщи (метагравелиты, метапесчаники, кварциты, плагиокианит-ставролитовые сланцы). Следовательно, в пределах Кейв в позднем архее создавались благоприятные условия для развития локальных грабенообразных впадин, в которых могли концентрироваться переотложенные коры выветривания, послужившие протолитом для известных кианитовых месторождений, образовавшихся значительно позднее — в свекофенское время (1900 млн лет назад) [Горбунов и др., 1981].

На рис. 3 представлены рассчитанные значения градиентов напряжений, пронормированные относительно максимального значения градиента по всему региону. Показано, что на фоне общего тектонического сжатия региона в земной коре формируется мозаичная картина распределения полей напряжений. Выделяются области повышенного градиента напряжений и области, где градиент напряжений практически отсутствует, т. е. выдерживается соотношение $\sigma_{xx} \cong \sigma_{yy}$. Области высоких градиентов перекрывают все области развития архейского магматизма. В пределах развития архейских поясов Колмозеро-Воронья и Терско-Аллареченского выделены области распространения комплементарных структур "сжатие—растяжение" (установленные ранее в работе [Филатова, 2009а]), представляющие собой ветвящуюся сеть растяжений и сжатий различной интенсивности с общим северо-западным простиранием. Территории, где резко изменяется интенсивность напряжений, рассматриваются как области нестабильности, предрасположенные к возникновению динамически развивающихся разрывов большой протяженности. Следует отметить, что оси максимальных растяжений северо-

западного направления Северо-Кольской зоны разломов (см. рис. 2) совпадают с положением архейских базит-гипербазитовых интрузивов и вулканитов, включая коматииты пояса Колмозеро-Воронья.

На рис. 3 видно, что области развития пород в пределах Кольского мегаблока, наиболее полно сохранивших структурные и минеральные парагенезисы архейского метаморфизма [Петров и др., 1986], перекрываются слабоградиентными зонами полей напряжений, для которых характерно соотношение $\sigma_{xx} \cong \sigma_{yy}$. Породы фундамента по наиболее высокотемпературным ассоциациям, а также текстурно-структурным особенностям характеризуются синтетектоническим метаморфизмом высоких ступеней амфиболитовой и гранулитовой фаций [Эволюция ..., 1987]. Причем обнаруживаются признаки латеральной дифференциации, указывающие на неоднородное термическое состояние коры в разных структурных зонах. Из экспериментальных данных известно, что прочность пород увеличивается с ростом всестороннего сжатия, но уменьшается с ростом температуры [Ботт, 1974]. В силу этого в выделенных слабоградиентных зонах могло складываться благоприятное соотношение термодинамических параметров метаморфизма, при которых фундамент впоследствии мог быть наименее дислоцирован.

Проведенные ранее исследования глубинной электропроводности геологических структур верхнего среза кристаллического фундамента северо-восточной части Балтийского щита показали, что в породах земной коры Кольского региона широко развиты как зоны низкого сопротивления, пространственно и генетически связанные с сульфидно-углеродисты-

Рис. 4. Ослабленные зоны в фундаменте Кольского региона, сформировавшиеся в архее в интервале 3,0—2,8 млрд лет назад: 1 — архейские пояса Колмозеро-Воронья, Терско-Аллареченский, Ёнский; 2 — Кейвская структура; 3 — высокоглиноземистые гнейсы кейвской серии (песчовотундровская толща); 4 — массивы анортозитов и габбро-анартозитов (архей—ранний протерозой); 5 — Печенга-Имандра-Варзутская палеорифтогенная структура; 6 — Лапландский гранулитовый пояс; 7 — расслоенные массивы основных и ультраосновных пород (ранний протерозой); 8 — щелочные интрузивы (палеозой); 9 — разломы (зоны разломов) на контакте мегаблоков; 10 — магмопроводящие зоны, установленные по аномальным значениям градиентов напряжений; 11 — магмопроводящие зоны, выделенные в поле градиентов средних значений по отдельным локальным аномалиям и совпадающие с областью развития пород Терско-Аллареченского пояса; 12 — ослабленные зоны в фундаменте, выделенные в поле градиентов напряжений со значениями ниже средних; 13 — аномальные значения касательных (скалывающих) напряжений, нормированные относительно максимального значения по региону (условные обозначения градации по цвету см. на рис. 3); архейские магмопроводящие зоны, известные по геологическим данным и подтвержденные результатами тектонофизического моделирования (цифры в кружках): 1 — пояс Колмозеро-Воронья, 2 — Терско-Аллареченский пояс, 3 — Цагинская, 4 — Щучьеозерская; ослабленные зоны в фундаменте, активизировавшиеся в раннем протерозое: 5 — Туломская, 6 — Колюцкая, 7 — Лиинахамарская. Остальные условные обозначения см. на рис. 2.

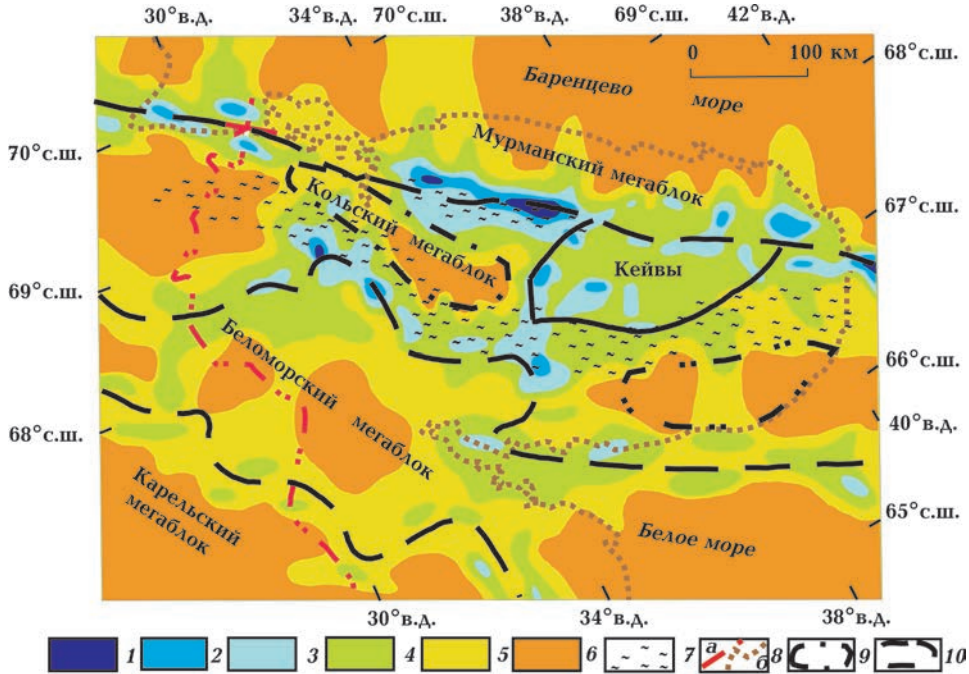
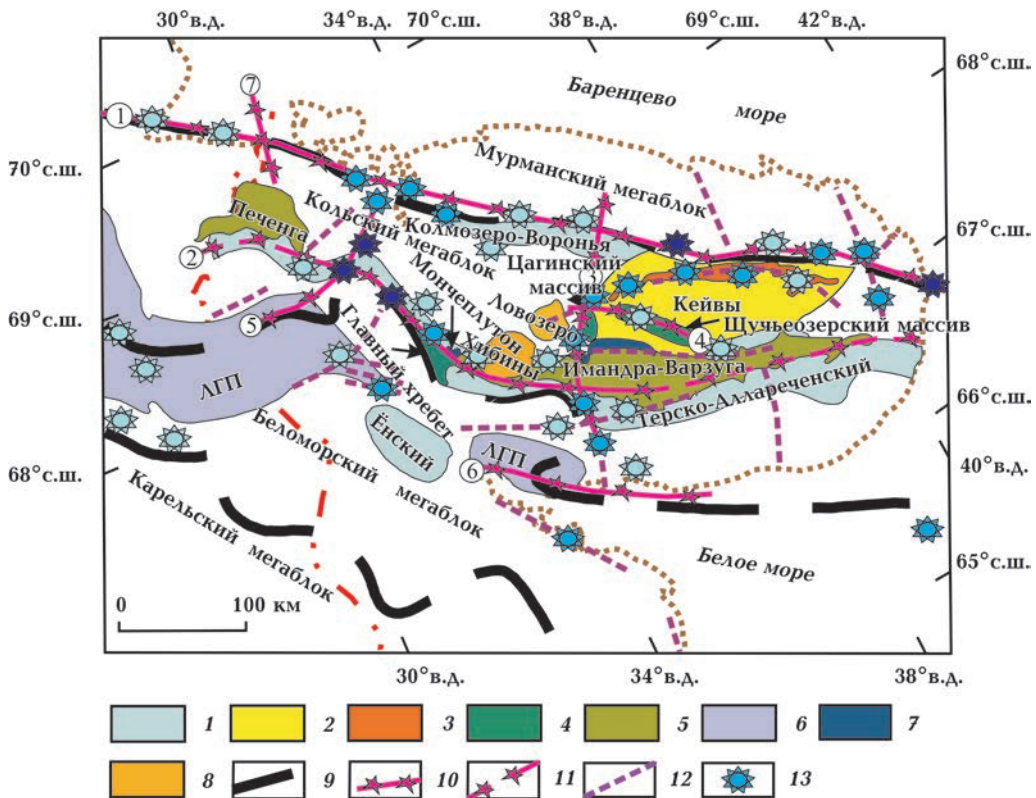


Рис. 3. Характер распределения градиентов напряжений, рассчитанных для архея — временный интервал 3,0—2,8 млрд лет назад. Нормированные градиенты напряжений, %: 1 — 80—100, 2 — 60—80, 3 — 40—60, 4 — 20—40, 5 — 10—20, 6 — 0—10; 7 — область развития комплементарных структур «сжатие—растяжение»; 8 — государственная граница России (а), современная береговая линия (б); 9—10 — области развития пород, сохранившие структурные и минеральные парагенезисы архейского метаморфизма (9 — гранулитовая фация; 10 — амфиболитовая фация). Остальные условные обозначения см. на рис. 2.



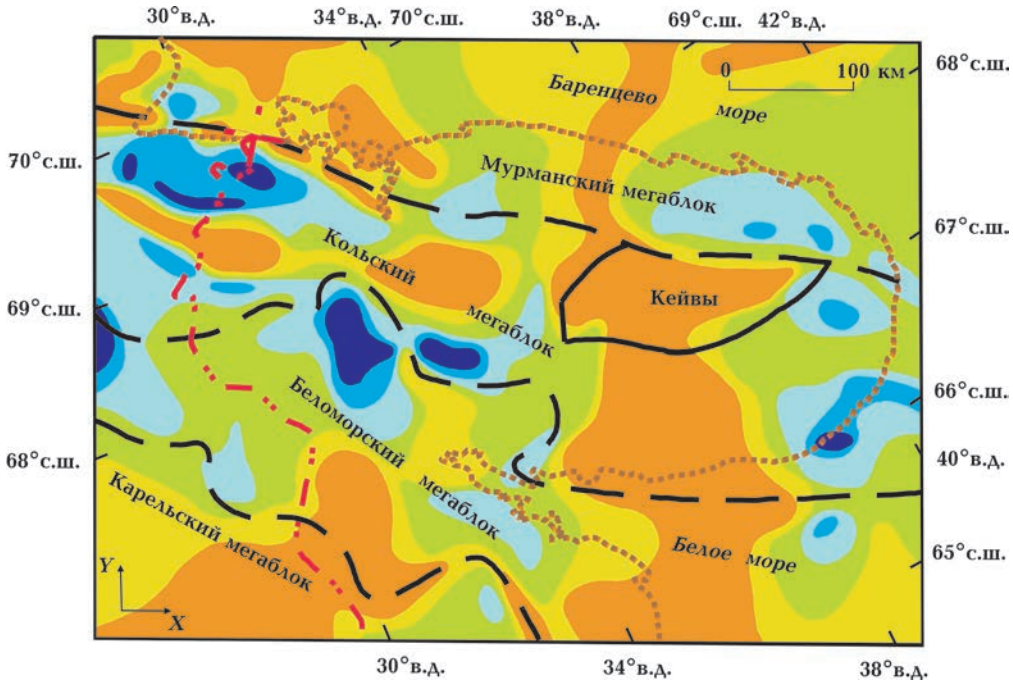


Рис. 6. Характер распределения градиентов напряжений, рассчитанных для архея (интервал 2,8—2,5 (2,55) млрд лет назад). Условные обозначения см. на рис. 2, 3.

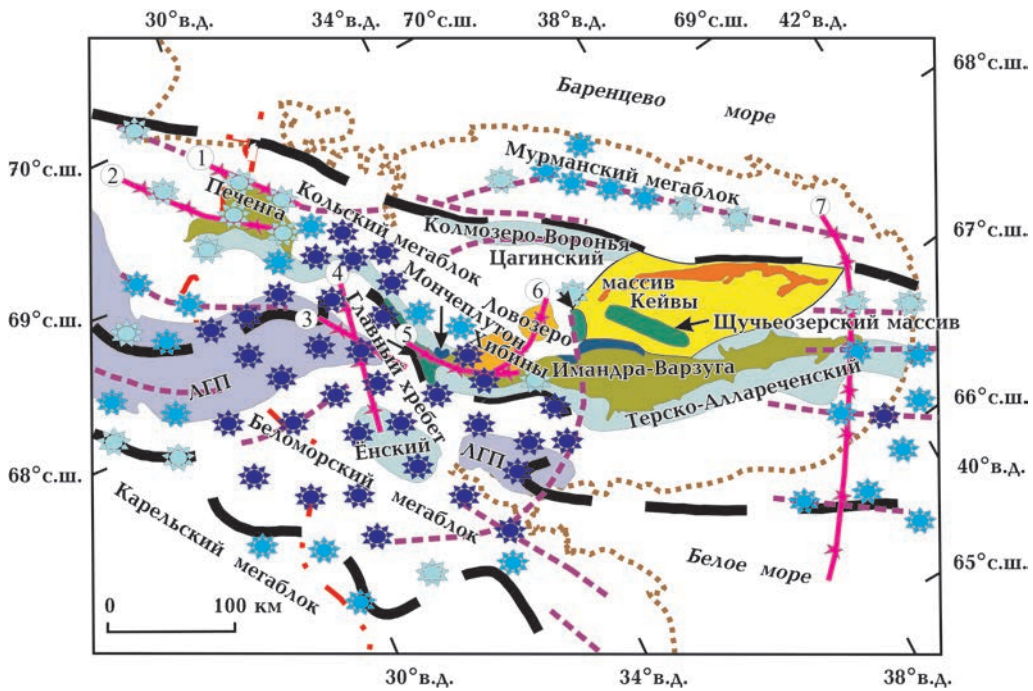


Рис. 7. Ослабленные зоны в фундаменте Кольского региона, сформировавшиеся в архее в интервале 2,8—2,5 (2,55) млрд лет назад. Раннепротерозойские магмопроводящие зоны, известные по геологическим данным и подтвержденные результатами тектонофизического моделирования (цифры в кружках): 1 — г. Генеральская, 2 — Порьыташская, 3 — Сальнотундровская-1, 4 — Сальнотундровская-2, 5 — Мончепуторская; ослабленные зоны в фундаменте, активизировавшиеся в палеозое: 6 — Хибинская; 7 — Восточно-Кольская зона, возраст и генезис неизвестны.

ми электронно-проводящими породами, так и зоны, характеризующиеся гипервысоким однородным сопротивлением [Жамалетдинов, 1990]. В данном случае современные области наиболее высокого сопротивления ($\rho \approx 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) в пределах Кольского мегаблока, соответствующие выходам архейского гранитогнейсового фундамента, породы которого претерпели архейский метаморфизм гранулитовой фации, перекрывают области очень низких градиентов напряжений, рассчитанных для позднего архея. Области, характеризующиеся аномально высоким сопротивлением, могли сформироваться в блоках с меньшей трещиноватостью и флюидонасыщенностью. Это указывает на то, что породы в слабоградиентных зонах изначально были менее деформированы и менее подвержены деформациям в последующие геологические эпохи. Такой стиль тектоники с наибольшей вероятностью мог установиться в том случае, если бы Кольский регион развивался в условиях внутриплитного режима.

Оценки интенсивности градиентов (см. рис. 3) показывают, что наибольшие величины градиентов получены для Кольского, затем Беломорского, последние по величине — для Мурманского мегаблоков. Западная и восточная части Кольского мегаблока по интенсивности градиентов отличаются — восточная более высокоградиентная. Граница раздела проходит по Цагинскому разлому, ограничивающему Кейвскую структуру с запада. Выделенные области относительно интенсивности градиентов напряжений также коррелируются с областями распространения базит-гипербазитовых интрузий в Кольском регионе. Например, особенно обильны архейский мантийный магматизм в Кейвской области повышенного градиента напряжений. Здесь много архейских железистотитанованадиеносных габбро-анортозитов и даек разного состава. Многие из таких тел сопряжены с северо-западными направлениями максимальных растяжений, некоторые, в том числе рудоносный Цагинский массив, совпадают с Цагинским разломом северо-восточно-северного направления. В широкой области Кольского мегаблока, прилегающей к Кейвам с запада и не характеризующейся высокими градиентами напряжений, значительных масс архейского базитового вещества не улавливается. В Беломорском мегаблоке, отмеченном невысокими градиентами напряжений, значительных масс архейского базитового вещества также не выявлено. В Мурманском мегаблоке, характеризующемся наименьшими

градиентами напряжений, наблюдаются наименьшие объемы базитового вещества.

На рис. 4 показаны выделенные по аномальным значениям градиентов напряжений главные магмовыводящие структуры региона, заложение которых в качестве ослабленных зон произошло в период 3,0—2,8 млрд лет назад. Зоны Колмозеро-Воронья, Терско-Алларецкенский магматический пояс, Цагинская и Щучьеозерская известны по геологическим данным как архейские, зоны Туломская и Колвицкая — как раннепротерозойские. Лиинхамарская зона прослеживается вдоль по разлому северо-восточного направления (северо-восточные разломы кольские геологи считают архейскими). В поле градиентов напряжений со значениями ниже средних величин от максимальных значений по региону выделены локальные аномальные зоны, которые также соотносятся с известными геологическими структурами архейского и раннепротерозойского возраста. Обозначены участки с аномальными значениями касательных (скальвающих) напряжений, пронормированных относительно максимального значения по региону. Все эти участки концентрируются в пределах областей высоких значений градиентов напряжений и приурочены к магмовыводящим структурам региона.

На рис. 5 (см. с. 60) показана ориентация осей главных напряжений, полученных для второй базовой модели. Характер распределения направлений осей главных напряжений для каждого мегаблока различен, но более упорядоченный по сравнению с первой базовой моделью. В пределах Мурманского мегаблока ориентация главных осей σ_1 в целом составляет единую веерную структуру. Для Кейвской структуры наблюдаются субширотное сжатие и, соответственно, субмеридиональное растяжение. Кольский мегаблок по Цагинскому разлому делится на два сектора — западный и восточный. В западном секторе, включая смежные районы северной оконечности Беломорского мегаблока, оси σ_1 ориентированы, преимущественно, в субмеридиональном направлении. Для восточного сектора характерна ориентация осей σ_1 в северо-восточно-северном и широтном направлениях. Подобная картина отмечается и для большей части Беломорского мегаблока (кроме его северной оконечности).

На рис. 6 (см. с. 58) представлены рассчитанные значения градиентов напряжений для интервала 2,8—2,5 (2,55) млрд лет назад. Выполненное численное моделирование показало, что

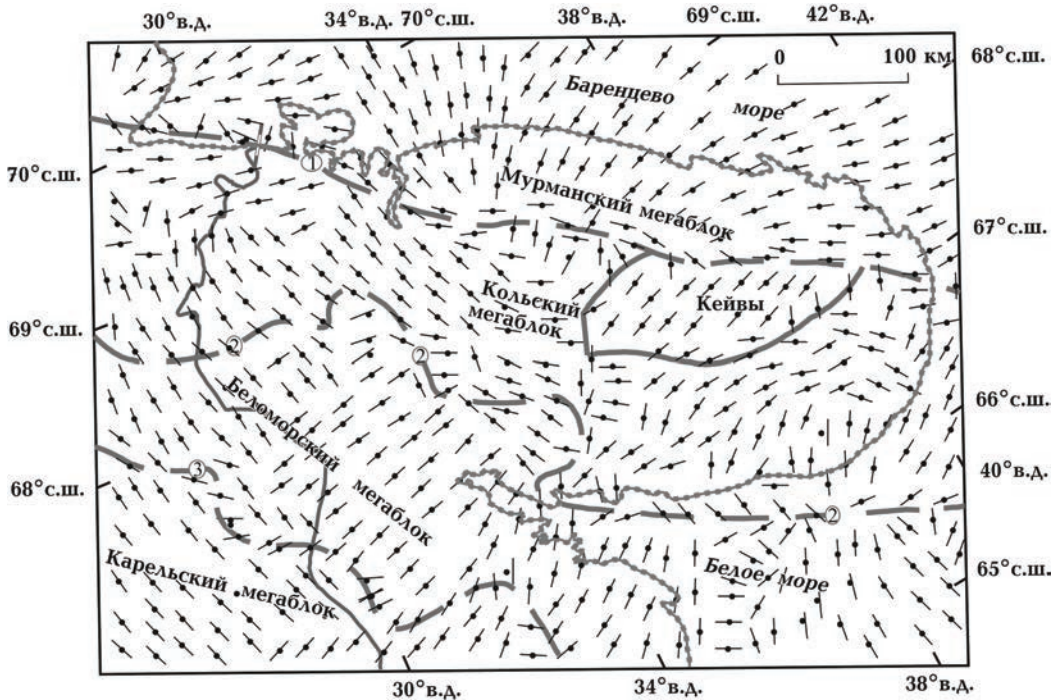


Рис. 5. Ориентация осей главных напряжений в пределах земной коры северо-восточной части Балтийского щита в архее (интервал 2,8—2,5 (2,55) млрд лет назад). Условные обозначения см. на рис. 2.

на фоне общего тектонического сжатия региона в земной коре также формируется мозаичная картина распределения полей напряжений. Выделяются области повышенного градиента напряжений и области, где градиент напряжений практически отсутствует. Слабоградиентные зоны в пределах Кольского мегаблока перекрывают области развития пород, претерпевших архейский метаморфизм: в центральной части — гранулитовой фации; в юго-восточной — амфиболитовой. Как указано выше, на этих территориях развиты породы, наиболее полно сохранившие структурные и минеральные парагенезисы архейского метаморфизма [Петров и др., 1986]. Области с аномальными значениями градиентов напряжений перекрывают все известные районы раннепротерозойского магматизма. Наиболее высокие градиенты напряжений наблюдаются в западной части Кольского мегаблока и в смежных территориях на севере Беломорского мегаблока. Мурманский мегаблок характеризуется невысокими значениями градиентов.

На рис. 7 показаны трассирующие зоны, выделенные по областям максимальных градиентов напряжений для второй базовой модели. Почти все выделенные зоны совпадают

с областями активизации тектономагматических процессов. Зоны г. Генеральская, Порьиташская, Сальютундровская-1, Сальютундровская-2, Мончетундровская — раннепротерозойские. Зоны г. Генеральская и Порьиташская субпараллельны, по местоположению приурочены к Печенгской структуре и в совокупности образуют конструкцию, которую можно представить как типичный рифтовый трог. Хибинская зона известна как палеозойская. Восточно-Кольская зона, простирающаяся субмеридионально и секущая восточную оконечность Кольского полуострова и акваторию Белого моря, не отмечается геологами как магмопроводящая структура, ее возраст и генезис неизвестны. Эта зона сечет под углом 30° систему разломов, показанную на тектонических схемах [Загородный, Радченко, 1983; Эволюция ..., 1987; Радченко и др., 1992] (с предположительной оценкой времени заложения разломов в позднем архее).

В поле касательных (скальвающих) напряжений (см. рис. 7) аномальными значениями отмечаются западный сектор Кольского и северная часть Беломорского мегаблоков, а именно: Лапландский гранулитовый пояс, Мончегорский рудный район, структуры Терско-Алла-

реченского пояса — Оленегорская и Воче-Ламбинская, Ёнский зеленокаменный пояс. Кроме перечисленных структур в поле касательных напряжений отчетливо выделяются Печенгская структура, центральная часть Мурманского мегаблока и восточная оконечность Кольского региона с захватом акватории Белого моря.

Следует отметить характерную особенность, которая прослеживается при сопоставлении полученных результатов для каждой базовой модели. Для первой базовой модели (3,0—2,8 млрд лет) в северной части Беломорского мегаблока, включающей Ёнский зеленокаменный пояс, наблюдается слабоградиентная зона, значения касательных напряжений незначительны. Для второй базовой модели (2,8—2,5 (2,55) млрд лет) на этой же территории фиксируются градиентные поля от аномальных значений до средних. При этом область перекрывается зоной максимальных значений касательных напряжений. Согласно геологическим данным, в неоархее (2,8—2,5 млрд лет) породы Беломорского мегаблока испытали неоднократное воздействие интенсивных деформаций и претерпели метаморфизм повышенных и умеренных давлений [Володичев, 1990; Миллер, Милькевич, 1995; Глебовицкий и др., 1996; Слабунов и др., 2006]. Следовательно, в интервале времени 3,0—2,8 млрд лет наиболее благоприятные условия для формирования ослабленных зон в фундаменте, контролирующего размещение зеленокаменных поясов, создавались в пределах Кольского мегаблока (Колмозеро-Воронья и Терско-Аллареченский). В отличие от этого, в интервале 2,8—2,5 (2,55) млрд лет наиболее благоприятные условия для разви-

тия хрупкого разрушения с последующей локализацией ослабленных зон возникали в северной части Беломорского мегаблока, включающей область распространения Ёнского зеленокаменного пояса.

Таким образом, выполненные исследования позволили реконструировать зоны повышенной проницаемости фундамента, сформировавшиеся в позднем архее и предопределившие локализацию тектономагматических процессов в регионе. При этом четко прослеживается унаследованность положения магмопроводящих структур от архея до раннего протерозоя, что подтверждается геологическими данными. Следовательно, напряженно-деформированное состояние среды могло оказывать влияние на стиль геодинамических процессов, обусловивших развитие мобильно-проницаемых зон в пределах жестких блоков северо-восточной части Балтийского щита. Анализ результатов численного эксперимента показывает, что заложение ослабленных зон в фундаменте Кольского мегаблока, предопределивших местоположение зеленокаменных поясов Колмозеро-Воронья и Терско-Аллареченский, произошло раньше, чем в северной части Беломорского мегаблока, включающей область распространения Ёнского зеленокаменного пояса. Разработанные методы могут быть использованы как методы экспресс-диагностики, позволяющие выделять ослабленные зоны в фундаменте и давать оценки их степени проницаемости с минимальными затратами времени и ресурсов.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований РАН (ОНЗ-6) "Геодинамика и физические процессы в литосфере".

Список литературы

- Баянова Т. Б., Пожиленко В. И., Смолькин В. Ф., Кудряшов Н. М., Каулина Т. В., Ветрин В. Р. Каталог геохронологических данных по северо-восточной части Балтийского щита. — Апатиты: Изд-во ГИ КНЦ РАН, 2002. — 53 с.
- Ботт М. Внутреннее строение Земли. — Москва: Мир, 1974. — 374 с.
- Вавакин А. С., Салганик Р. Л. Об эффективных характеристиках неоднородных сред с изолированными неоднородностями // Изв. АН СССР. МТТ. — 1975. — № 3. — С. 65—75.
- Володичев О. И. Беломорский комплекс Карелии (геология и петрология). — Ленинград: Наука, 1990. — 245 с.
- Вревский А. Б. Коматиты из раннедокембрийского пояса Полмос-Порос (Кольский полуостров) // Докл. РАН. — 1980. — 252, № 5. — С. 1216—1219.
- Вревский А. Б. Петрология и геодинамические режимы развития архейской литосферы. — Ленинград: Наука, 1989. — 143 с.
- Геологическая карта Кольского региона (северо-восточная часть Балтийского щита). М 1 : 500 000 / Гл. ред. Ф. П. Митрофанов. — Апатиты: Изд-во ГИ КНЦ РАН, 1996.
- Глебовицкий В. А., Дук В. Л., Кицул В. И., Митрофанов Ф. П., Шарков Е. В., Эз В. В. Взаимосвязь эндогенных процессов в развитии структуры

- земной коры в раннем докембрии // Проблемы тектоники раннего докембрия. — Ленинград: Наука, 1980. — С. 57—76.
- Глебовицкий В. А., Миллер Ю. В., Другова Г. М., Милькевич Р. И., Вревский А. Б. Структура и метаморфизм Беломорско-Лапландской коллизионной зоны // Геотектоника. — 1996. — № 1. — С. 63—75.
- Горбунов Г. И., Бельков И. В., Макиевский С. И., Горяинов П. М., Сахаров А. С., Югин В. А., Онохин Ф. М., Гончаров Ю. В., Антонюк Е. С. Минеральные месторождения Кольского полуострова. — Ленинград: Наука, 1981. — 272 с.
- Жамалетдинов А. А. Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируемыми источниками поля (Балтийский щит, Русская платформа). — Ленинград: Наука, 1990. — 159 с.
- Загородный В. Г., Радченко А. Т. Тектоника раннего докембрия Кольского полуострова (состояние изученности и проблемы). — Ленинград: Наука, 1983. — 96 с.
- Земная кора восточной части Балтийского щита / Под ред. К. О. Кратца. — Ленинград: Наука, 1978. — 232 с.
- Коптев А. И., Ершов А. В. Роль гравитационного потенциала литосферы в формировании глобального поля напряжений // Физика Земли. — 2010. — № 12. — С. 66—81.
- Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. — Москва: Мир, 1987. — 328 с.
- Миллер Ю. В., Милькевич Р. И. Покровно-складчатая структура Беломорской зоны и ее соотношение с Карельской гранит-зеленокаменной областью // Геотектоника. — 1995. — № 6. — С. 80—93.
- Митрофанов Ф. П. Современные проблемы и некоторые решения докембрийской геологии кратонов // Литосфера. — 2001. — № 21. — С. 5—14.
- Мухомелшвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. — Москва: Наука, 1966. — 707 с.
- Петров В. П., Беляев О. А., Волошина З. М., Богданова М. Н., Ивлиев А. И. Метаморфизм супракратостальных комплексов раннего докембрия (северо-восточная часть Балтийского щита). — Ленинград: Наука, 1986. — 272 с.
- Радченко А. Т., Балаганский В. В., Виноградов А. Н., Голионко Г. Б., Петров В. П., Пожиленко В. И., Радченко М. К. Докембрийская тектоника северо-восточной части Балтийского щита (объяснительная записка к тектонической карте масштаба 1 : 500 000). — Санкт-Петербург: Наука, 1992. — 111 с.
- Сейсмичность при горных работах / Под ред. Н. Н. Мельникова. — Апатиты: Изд-во ГИ КНЦ РАН, 2002. — 325 с.
- Слабунов А. И., Лобач-Жученко С. Б., Бибикина Е. В., Балаганский В. В., Сорьонен-Варг П., Володичев О. И., Щипанский А. А., Светов С. А., Чекулаев В. П., Арестова Н. А., Степанов В. С. Архей Балтийского щита: геология, геохронология, геодинамические обстановки // Геотектоника. — 2006. — № 6. — С. 3—32.
- Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Под ред. Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протодряконова. — Москва: Недра, 1975. — 279 с.
- Филатова В. Т. Влияние напряженно-деформированного состояния среды на формирование ослабленных зон в архейском фундаменте северо-восточной части Балтийского щита // Геофиз. журн. — 2009а. — 31, № 3. — С. 41—52.
- Филатова В. Т. Особенности формирования полей напряжений в Беломорском мегаблоке при режиме коллизионной геодинамики // Докл. РАН. — 2002. — 382, № 6. — С. 821—825.
- Филатова В. Т. Оценка напряженно-деформированного состояния земной коры северо-восточной части Балтийского щита в позднеархее // Докл. РАН. — 2009б. — 424, № 2. — С. 249—253.
- Шаров Н. В., Виноградов А. Н., Галдин Н. Е., Ганьшин Ю. В., Горбачевич Ф. Ф., Загородный В. Г., Зайцев В. Г., Ильченко В. Л., Исанина Э. В., Казанский В. И., Кальнин К. А., Караев Н. А., Козлов Н. Е., Кузнецов А. В., Лизинский М. Д., Лобанов К. В., Мегведев Р. В., Платоненкова Л. Н., Пожиленко В. И., Полякова В. А., Распоженский Ю. А., Рослов Ю. В., Смирнов Ю. П., Смитсон С., Смолькин В. Ф. Сейсмогеологическая модель литосферы Северной Европы: Лапландско-Печенгский район. — Апатиты: КНЦ РАН, 1997. — 226 с.
- Эволюция земной коры и эндогенной металлогенической зональности северо-восточной части Балтийского щита (связь металлогении с глубинным строением) / Под ред. И. В. Белькова. — Ленинград: Наука, 1987. — 107 с.
- Coblentz D. D., Richardson R. M., Sandiford M. On the gravitational potential on the Earth's lithosphere // Tectonics. — 1994. — 13. — P. 929—945.
- Kroner A., Compston W. Archean tonalitic gneiss of Finish Lapland revisited: zircon ion-microprobe ages // Contrib. Mineral. Petrol. — 1990. — 76. — P. 33—41.
- Mitrofanov F. P., Pozhilenko V. I., Smolkin V. F., Arzamastsev A. A., Yevzerov V. Ya., Lyubtsov V. V., Shipilov E. V., Nikolaeva S. B., Fedotov Zh. A. Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield). — Apatity: KSC RAS, 1995. — 144 p.