

УДК 550.311:551.24(470.21)

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ КЕЙВСКОГО БЛОКА И ИХ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПРИРОДА

В.Т. Филатова¹, В.П. Петров²

¹Геологический институт КНЦ РАН

²КНЦ РАН

Аннотация

Для оценки влияния тектонических режимов и характера метаморфических процессов на вещественный состав, строение и промышленную значимость месторождений полезных ископаемых Кейвского блока определена структура геофизических аномалий в пределах района и выявлены её корреляционные связи с петрофизическими характеристиками пород, а также со стадийностью проявления деформационных и метаморфических процессов.

Ключевые слова:

Кейвы, неоархей, палеопротерозой, Балтийский щит, геофизическое поле, тектонический режим, метаморфический процесс.



Введение

В работе рассмотрены тектоноструктурные и пространственно-временные особенности формирования земной коры Кейвского рудного района, наиболее интересного геологического объекта в пределах Кольского региона из-за наличия в нем своеобразных архейских комплексов пород, которые в других структурах региона не наблюдаются. Этот блок сложен неоднократно метаморфизованными и деформированными образованиями

зрелой континентальной коры. На его территории известны месторождения и рудопоявления индустриальных минералов и редкометалльного сырья. К уникальным объектам относятся кианитовые сланцы, образующие крупнейшее в мире Кейвское месторождение огнеупорного и глинозёмистого сырья, протягивающееся на 120 км. Многоэтапная тектонометаморфическая переработка этих пород обусловила значительное разнообразие отдельных типов кианитовых руд и их специфические черты структурно-тектонической локализации. Также промышленный интерес представляют месторождения титаномагнетитовых руд с попутным ванадием, приуроченные к габбро-лабрадоритовым массивам. В пределах структуры широко развиты рудопоявления редких элементов. В силу всего этого Кейвы рассматриваются многими исследователями как особая структура докембрия Балтийского щита со специфическими чертами геологии, развития и строения земной коры.

Ниже приводятся результаты впервые выполненного тектонофизического моделирования с использованием численных методов для объяснения динамики становления системы деформационно-магматических структур северо-востока Балтийского щита в раннем докембрии. В этих целях построены количественные модели напряженно-деформированного состояния земной коры региона с учётом её эволюционного развития. Результаты исследований позволили выделить ослабленные зоны в фундаменте Кейвской структуры (сформировавшиеся в интервале мезоархей – палеопротерозой) и показать, что они коррелируют с местоположением областей развития тектономагматической активности региона в архее и палеопротерозое. Впервые определена структура геофизических аномалий в пределах района и выявлены

ее корреляционные связи с петрофизическими характеристиками пород и со стадийностью проявления деформационных и метаморфических процессов. Выявлено, что тектонические режимы и характер метаморфических процессов могли оказать существенное влияние на вещественный состав, строение и промышленную значимость месторождений полезных ископаемых Кейвского блока. Задача определения тектоноструктурных условий формирования и пространственно-временных закономерностей развития земной коры региона весьма актуальна. Корреляционные связи между физическими характеристиками пород, геофизическими полями, геолого-структурными факторами, тектоникой и оруденением могут рассматриваться как информативный признак при выяснении условий рудообразования и при металлогеническом прогнозировании.

Геологическая позиция района

Характерная особенность докембрийской земной коры северо-восточной части Балтийского щита заключается в ее блоковом строении. Всеми исследователями отмечается структурная и формационная неоднородность земной коры региона, которая рассматривается как результат последовательного развития, начиная с мезоархея, различных эндогенных геологических процессов (тектонических, магматических, метаморфических) [1–3]. В пределах региона в качестве главных структурных элементов выделяются архейские мегаблоки – Мурманский, Кольский, Беломорский и Карельский, в своей взаимосвязи формирующие коллажное строение земной коры (рис. 1). Особое место в структуре коры занимают архейские зеленокаменные пояса – Колмозеро-Воронья, Ёнский, Терско-Аллареченский и палеопротерозойские мобильные пояса – Лапландский гранулитовый и Печенга-Имандра-Варзугский рифтогенный, а также гигантские палеозойские щелочные массивы (Хибинский, Ловозерский). Палеопротерозойский Печенга-Имандра-Варзугский рифтогенный пояс наследует область развития архейского Терско-Аллареченского пояса.

Современный структурный план региона в основном сформировался на завершающей стадии свекофенского тектогенеза. В результате его перестройки возникли основные складчатые структуры северо-западного простираения, но в восточной части региона наблюдаются элементы более древних архейских структур, которые сохранили реликтовую субширотную ориентировку [1, 2].

Кейвский блок, встроенный в каркас Кольского мегаблока, – структурный элемент второго плана, он занимает особое положение не только из-за своего размера, но, прежде всего, из-за особенностей своего строения и состава пород [3] (рис. 1). На северо-востоке данная структура граничит с Мурманским мегаблоком, на юго-востоке – с Пурначским блоком, на юго-западе – с Имандра-Варзугой, на северо-западе – с Центрально-Кольским блоком. Особенность состава слагающих пород состоит в том, что в пределах выделенных зон развиты комплексы, которых практически нет в других районах региона. В структурном плане это пологая синклиналь при наличии блокового поднятия фундамента на отдельных участках. Также ее можно представить как грабен в виде двухъярусного складчато-глыбового сооружения [4]. Предполагается, что Кейвский блок в архее развивался в условиях режима срединного массива [1].

Рассматриваемая структура ранее выделялась условно как область преимущественного развития пород определённого возраста. По мере изучения геологии и тектоники Кольского региона в пределах Кейв выделены отдельные структурные зоны (Верхнепонойский блок, Пурначский блок, Западные Кейвы, Понойская зона, Центральные Кейвы, Большие Кейвы, Малые Кейвы) (рис. 2), их границы в основном проходят по крутопадающим разрывным нарушениям, зачастую разделяющим однородные геологические комплексы [1, 2]. Наблюдаемые тектонические нарушения в районе исследований не относятся к периоду формирования первичных геологических образований, а связаны с палеопротерозойским этапом развития земной коры региона. Схема расположения структурных зон в пределах Кейв основана на учете

только морфологических особенностей геологических тел и не несет информации о геологической истории развития района [2]. При этом выделенные зоны различаются типом и интенсивностью складчатости, а также степенью дифференцированности структур. Выраженная зональность может отражать интегральный эффект различных и многократно проявившихся эндогенных и экзогенных процессов в земной коре региона.

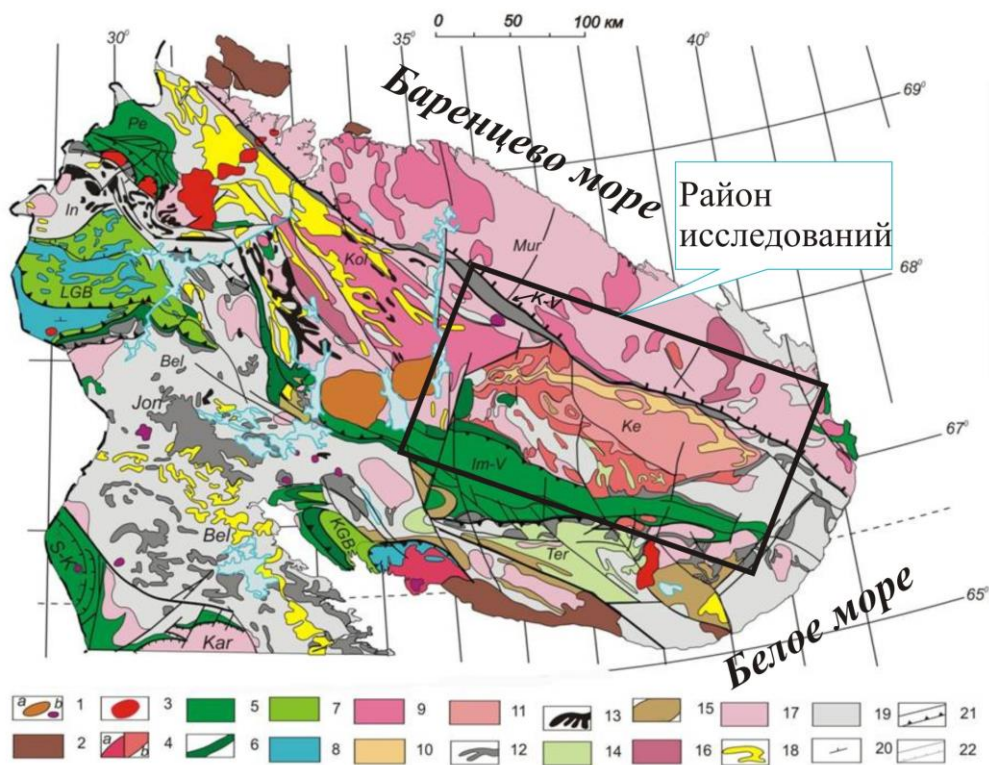


Рис. 1. Геолого-структурная карта Кольского региона Балтийского щита (по работе [3]).
 Области: Mur – Мурманская; Kol – Кольская; Bel – Беломорская; Ter – Терская; Ке – Кейвская; In – Инари, Kar – Карельская. Пояса: Jop – Ениский; K-V – Колмозеро-Воронья (архейские зеленокаменные); LGB – Лапландский; KGB – Кандалакиско-Колвицкий (гранулитовые); Pe – Печенга, Im-V – Имандра-Варзуга, S-K – Северо-Карельский (палеопротерозойские).
 1 – контуры палеозойских интрузий; 2 – осадочные породы верхнего протерозоя; Палеопротерозой: 3 – граниты, гранодиориты и диориты; 4 – чарнокиты, граниты (а), щелочные граниты (в Кейвах – неоархейские) (б); 5 – вулканогенно-осадочные породы; 6 – анортозиты, габбро-анортозиты (в Кейвах – неоархейские), габбро, пироксениты, перидотиты. Палеопротерозой (или неоархей?): 7 – гранулиты основного и среднего состава; 8 – кислые гранулиты. Неоархей: 9 – гранодиориты, диориты и эндербиты; 10 – глиноземистые и суперглиноземистые гнейсы и сланцы; 11 – кислые гнейсы; 12 – фрагменты зеленокаменных поясов (гнейсы, амфиболиты и метакоматииты); 13 – фрагменты железорудной (BIF) формации (гнейсы, амфиболиты и железистые кварциты); 14 – гнейсы и сланцы; 15 – гнейсы и амфиболиты; 16 – гранодиориты и диориты; 17 – плагиограниты и гранито-гнейсы; 18 – кианит-гранат-биотитовые гнейсы; 19 – гранито-гнейсы, гнейсы, мигматиты и редко амфиболиты. 20 – элементы залегания, 21 – субвертикальные разломы и пологие надвиги, разделяющие протерозойские структуры, 22 – субвертикальные разломы и надвиги

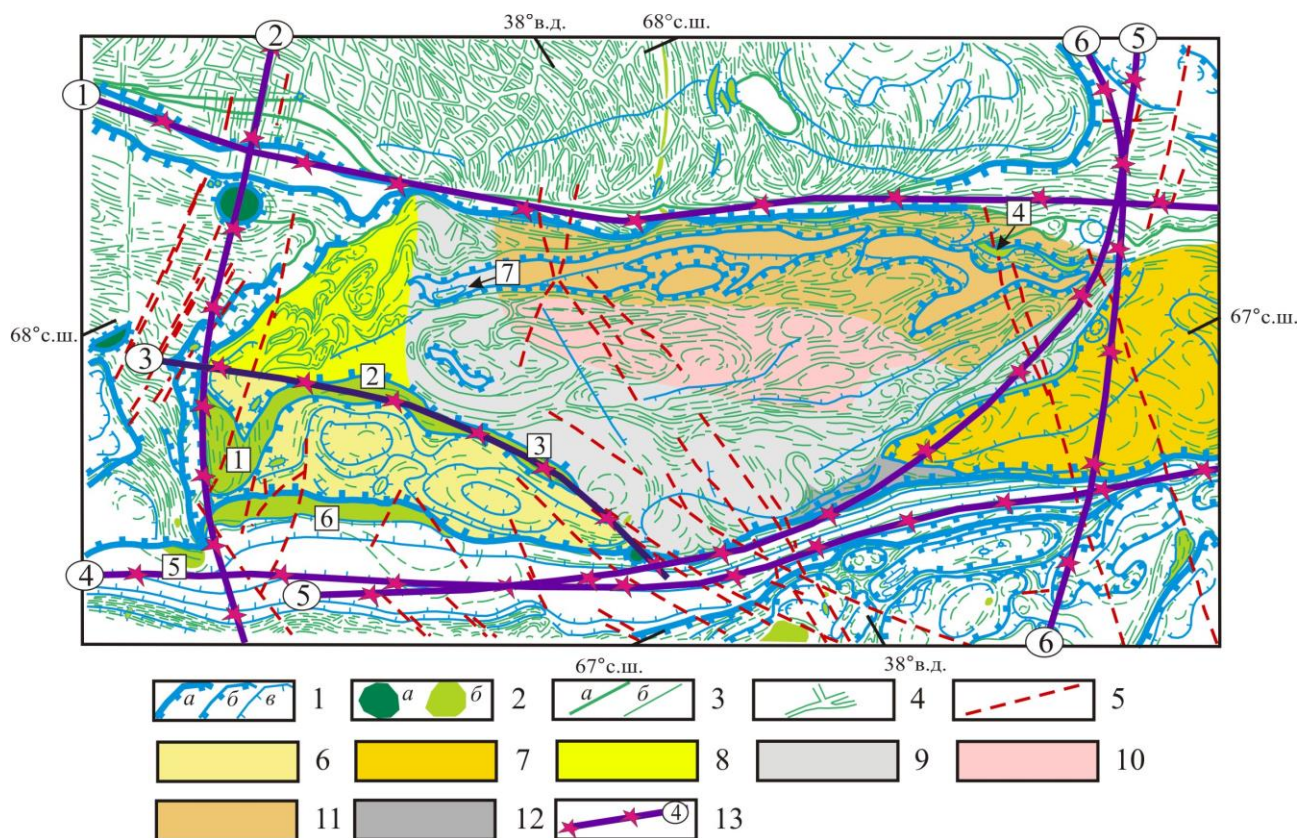


Рис. 2. Схема распределение геофизических неоднородностей в пределах Кейвской структуры и сопредельных территорий:

1 – градиенты гравитационного поля: а – 1-го, б – 2-го, в – 3-го порядков; 2 – аномалии магнитного поля: а – локальные изометричные, б – локальные > 3000 нТл; 3 – оси локальных магнитных аномалий: а – протяженные интенсивные, б – рядовые; 4 – секущие зоны пониженных значений магнитного поля (Мурманский блок); 5 – разрывные нарушения по геофизическим данным; 6–12 – структурные зоны (по данным работы [2]): 6 – Верхнепонойский блок, 7 – Пурначский блок, 8 – Западные Кейвы, 9 – Понойская зона, 10 – Центральные Кейвы, 11 – Большие Кейвы, 12 – Малые Кейвы; 13 – ослабленные зоны в фундаменте (выделены по результатам тектонофизического моделирования [9–11]): 1 – Северо-Кольская, 2 – Цагинская, 3 – Щучьеозерская, 4 – Терско-Аллареченская (Имандра-Варзугская), 5 – Восточные Кейвы – Панаречка, 6 – Восточно-Кольская. Цифрами в квадратах обозначены массивы: 1 – Цагинский, 2 – Щучьеозерский, 3 – Медвежьеозерский, 4 – Ачинский, 5 – Фёдоровы тундры, 6 – Панские тундры, 7 – хребет Серповидный

Геологические особенности района

Индивидуальное своеобразие рассматриваемой структуры определяется широким развитием мощной толщи кислых вулканитов Лебяжинского комплекса (нижний структурный ярус) и метасадочных пород Кейвского комплекса (верхний ярус). В низах супракристаллического разреза развиты андезито-базальты Понойского комплекса, которые прослеживаются фрагментарно на контакте Понойской зоны и Центрально-Кейвского блока (Центральные Кейвы). При этом отсутствуют явно выраженные несогласия на границе между Понойским и Лебяжинским комплексами. Первоначально U-Pb изохронный возраст метавулканитов (район Малых Кейв) был определен как 2871 ± 15 млн лет и интерпретировался как время кристаллизации кислых вулканитов [5]. Новое U-Pb датирование магматических

цирконов из кислых вулканитов района Больших Кейв показало, что, вероятно, возраст образования метавулканитов нижнего яруса может быть 2678 ± 7 млн лет [6]. Возраст 2871 ± 15 млн лет предположительно определяет время образования эффузивных протолитов пород нижнего структурного яруса, которые могли формироваться в течение продолжительного времени с учетом перерывов. На породах нижнего яруса парасланцы (верхний ярус) залегают с несогласием. В современном эрозионном срезе они сохранились в грабенах, имеющих линейную форму. Сланцы верхнего яруса по особенностям химического состава относятся к образованиям осадочного чехла неоархейской протоплатформы [1], но время их формирования геохронологическими изотопными методами не определено. Комплекс кейвских сланцев, развитый преимущественно в пределах Больших Кейв и претерпевший многоэтапные тектонометаморфические преобразования, составляет уникальное по своим масштабам Кейвское месторождение высокоглиноземистого сырья, представленное углеродистыми кианитовыми сланцами.

В пределах Кейв широко развиты плутонические породы (ультрабазиты, габброиды, анортозиты, щелочные граниты, граниты, пегматиты), прорывающие породы блока и сформированные в интервале от 2.7 до 1.65 млрд лет [5]. Магматизм в неоархейский период начинался с внедрением массивов габбро-лабрадоритов (Цагинский, Щучьеозерский, Медвежьеозерский, Ачинский) в интервале от 2.68 до 2.63 млрд лет и завершился формированием тел щелочных и нефелиновых сиенитов (2.67–2.61 млрд лет). Наиболее распространённые интрузивные породы в районе исследований – щелочные граниты, возраст которых укладывается в интервал 2.67–2.63 млрд лет [5].

Габбро-лабрадориты преимущественно развиты в пределах Верхнепонойского блока, но маломощные ленточные тела присутствуют в зоне контакта Мурманского мегаблока и Кейвской структуры и на контакте с Пурначским блоком, щелочные граниты – в пределах Верхнепонойского блока, Западных Кейв и Понойской зоны. Небольшие массивы щелочных и нефелиновых сиенитов пространственно ассоциируют со щелочными гранитами. В районе широко развиты редкометалльные пегматиты. U-Pb возраст пегматитов, пространственно ассоциирующихся с массивами щелочных гранитов, определен как палеопротерозойский – 1682 ± 35 млн лет [5]. В северо-западной части Кейв (север Понойской зоны, район хребта Серповидный) среди архейских сланцев наблюдается незначительное распространение вулканогенно-осадочных пород, которые образуют останцы или фрагменты грабен-синклинальных структур. Данные породы на структурно-формационном уровне коррелируют с образованиями варзугской серии в пределах Имандра-Варзугской рифтогенной структуры палеопротерозойского возраста [1, 2, 7], которая ограничивает Кейвский блок с юга. Непосредственно на контакте Кейв и Имандра-Варзуги локализованы палеопротерозойские массивы основных-ультраосновных пород Фёдоровой и Панских тундр.

Архейский фундамент северо-востока Балтийского щита характеризуется сложной полициклической историей метаморфизма. Породы, слагающие фундамент, в неоархее претерпели синтектонический метаморфизм высоких ступеней амфиболитовой и гранулитовой фаций, но при этом в пределах Кейвской структуры следов проявления указанного метаморфизма не отмечается. Видимо, на тот период термодинамические обстановки формировались дифференцировано по отдельным структурным зонам. В супракрустальных образованиях Кейвского блока (Лебяжинский комплекс) наблюдаются слабые и неконтрастные следы ультраметаморфизма по сравнению с архейскими комплексами смежных областей [8]. Породы Лебяжинского комплекса в неоархее претерпели метаморфизм низкотемпературных фаций неустановленного фациального типа. В палеопротерозое, в течение свекофенского тектонометаморфического цикла, Лебяжинский и Кейвский комплексы в пределах большей части территории Кейвского блока – Большие и Центральные Кейвы, Понойская зона, Малые Кейвы – были метаморфизованы в условиях дистен-ставролитовой субфации. В зонах нахождения щелочных гранитов в Западных Кейвах и в обрамлении Кейвского блока

метаморфизм на тот период достигал силлиманитовой субфации с развитием процессов мигматизации и щелочного метасоматоза. При этом в Западных Кейвах контактово-метасоматические воздействия щелочных гранитов на породы Лебяжинского и Кейвского комплексов проявились в региональном масштабе [8]. Следует отметить, что степень метаморфизма в блоках заметно варьирует, и границы метаморфических зон трансгрессивны по отношению к структурным образованиям.

На основе имеющихся данных о геологии и петрологии палеопротерозойских метаморфических комплексов признается, что при объяснении механизмов формирования земной коры региона необходимо учитывать следующие факторы: а) имело место тектономагматическое и метаморфическое преобразование ранее сформированной архейской континентальной коры; б) давление при метаморфизме супракрустальных образований определялось региональными и локальными тектоническими напряжениями в земной коре; в) метаморфические данные не допускают прямого использования положений тектоники плит при реконструкции геодинамических обстановок развития коры в палеопротерозое [8].

Результаты тектонофизических исследований

В целях объяснения динамики становления системы деформационно-магматических структур северо-востока Балтийского щита в раннем докембрии нами впервые выполнены исследования с использованием методов численного моделирования. Допускается, что тип тектономагматической активности, установившийся в раннем докембрии региона, был внутриплитный, а Кейвский блок развивался в условиях режима срединного массива, начиная с мезоархея. Полагаем, что северо-восточная часть Балтийского щита на тот период представляла собой неоднородное упругое тело, подверженное действию объёмных сил и заданных напряжений на его границе. Рассматриваемая область состоит из нескольких конечных подобластей, каждая из них считается однородно изотропной и линейно-упругой с линейно-упругими постоянными (коэффициент Пуассона и модуль Юнга), значения которых приведены в работе [9]. Каждый архейский мегаблок (включая Кейвский блок) – это отдельная подобласть. В целях построения количественных моделей напряжённо-деформированного состояния земной коры региона с учётом её эволюционного развития решалась краевая задача в напряжениях [10].

При решении задачи рассмотрены три временных этапа развития Кольского региона – мезоархей, неоархей, палеопротерозой, соответственно, на каждом этапе задавалась определённая базовая модель, описывающая исследуемую область с учётом сформировавшихся к этому времени геологических структур. К началу неоархея консолидация земной коры превращает регион в относительно стабильную континентальную структуру, и исследуемая область на тот период находится в устойчивом состоянии [1, 2]. Следовательно, можно допустить, что регион в тот период мог испытывать всестороннее равномерное сжатие вследствие действия удалённых сил. В раннем протерозое основной фронт тангенциальных напряжений был направлен на северо-восток [1, 2]. Тогда Мурманский мегаблок занимал устойчивое положение; не исключено, что он испытывал давление, направленное с северо-востока на юго-запад. Следовательно, допускаем, что в раннем протерозое регион был подвержен одноосному сжатию равномерно распределёнными усилиями с юго-запада и с северо-востока. В итоге рассчитывалось три варианта нагрузки области: мезоархей и неоархей – всестороннее равномерное сжатие; палеопротерозой – одноосное сжатие по линии юго-запад – северо-восток [11]. В последующие эпохи значительных геолого-тектонических процессов регион не переживал. В силу того что нет достоверных данных об абсолютной величине действовавших в регионе сил, принимаем их интенсивность равной единице. Для каждой базовой модели рассчитаны максимальные по абсолютному значению скалывающие напряжения [10]. Окончательно вычисленные величины скалывающих напряжений нормировались и представлялись в процентном соотношении от максимального значения по региону,

а по их аномальным значениям выделялись линейные зоны, интерпретируемые как ослабленные области в фундаменте и предопределившие локализацию магматических процессов в регионе.

Выполненные расчеты показали, что структурные особенности Кольского региона, обусловленные развитием проницаемых зон земной коры региона, отчётливо выделяются в поле скальвающих напряжений. Исследования с использованием базовой модели для мезоархея выявили линейные области в фундаменте Кейвского блока, которые сформировались, предположительно, в мезоархее как ослабленные: (1) обрамляющие Кейвскую структуру – Северо-Кольская, Цагинская, Терско-Аллареченская (Имандра-Варзугская); (2) в пределах структуры – Щучьезерская (рис. 2). В неорхее к областям Цагинская и Щучьезерская было приурочено внедрение комплементарной ассоциации габбро-лабрадоритов и субщелочных гранитов [2, 5]. Терско-Аллареченская ослабленная зона контролировала формирование архейского Терско-Аллареченского зеленокаменного пояса, местоположение которого в палеопротерозое унаследует Печенга-Имандра-Варзугская рифтогенная система. Расчеты для второй базовой модели (неорхей) позволили выявить ослабленную зону Восточно-Кольскую, обрамляющую Кейвы с востока, простирающуюся субмеридионально и секущую восточную оконечность Кольского полуострова и акваторию Белого моря (рис. 2). Эта зона не отмечается как магмапроводящая, но при этом сечет под углом в 10° систему разломов (предположительно архейского возраста), представленную на тектонических схемах региона [1, 2].

Реконструкции напряженно-деформированного состояния коры для северо-востока Балтийского щита при принятых граничных условиях показали, что фундамент Кейв в неорхейское время не испытывал существенного воздействия скальвающих напряжений в отличие от сопредельных территорий [9–11]. Имеющиеся данные о палеотектонической зональности в Кольском регионе констатируют, что район Кейв на тот период относился к слабо дифференцированной области, здесь следов развития архейских зеленокаменных поясов не наблюдается в отличие от других районов региона [2].

Породы, слагающие фундамент в Центрально-Кольском блоке, в неорхее претерпели синтетектонический метаморфизм высоких ступеней амфиболитовой и гранулитовой фаций, а в пределах Кейвской структуры следов проявления подобного метаморфизма не отмечается [8]. Следовательно, на фоне стабилизации региона термодинамические обстановки формировались дифференцированно по отдельным структурным зонам так же, как и поля скальвающих напряжений на фоне всестороннего равномерного сжатия.

В палеопротерозое имели место широкомасштабные тангенциальные напряжения, почти все архейские структурно-вещественные комплексы Кольского региона в разной степени были переработаны, и сформировалась сеть разломов, в том числе в пределах Кейв, разграничивающая структурные зоны [1]. Наиболее интенсивно деформировались шовные зоны, окаймляющие Кейвскую структуру, особенно в районе Малых Кейв, где наблюдается чешуйчато-блоковое строение [1, 2]. По аномальным значениям скальвающих напряжений отчётливо выделяется линейная зона Восточные Кейвы – Панаречка, протягивающаяся по контакту Кейвского блока с Пурначским блоком и Имандра-Варзугой и охватывающая Малые Кейвы. Она рассматривается как мобильно-проницаемая зона, определившаяся в палеопротерозое (рис. 2). Кроме этого, результаты тектонофизического моделирования показывают, что тогда были ремобилизованы по периферии Кейвской структуры зоны, сформировавшиеся в архее как ослабленные – Северо-Кольская, Терско-Аллареченская (Имандра-Варзугская) и Восточно-Кольская (рис. 2). Причем Восточно-Кольская зона протягивается вглубь современной акватории Баренцева моря и на своём продолжении совпадает с восточным бортом Восточно-Баренцевоморской рифтовой системы палеозойского возраста.

Выделение геофизических неоднородностей и обсуждение результатов

Выполненный анализ структуры геофизических аномалий в пределах Кейвского блока и непосредственно примыкающей к ней полосы сопредельной территории позволил построить

схемы распределения геофизических неоднородностей (рис. 2) и оценить их характер. В этих целях использованы карты гравитационного и магнитного полей масштаба 1:200000. Для характеристики гравитационного поля рассчитывались градиенты поля Δg , а порядок градиентов определялся при их нормировании относительно максимального значения по региону: 1.0–0.7 – градиент поля Δg 1-го порядка, 0.7–0.4 – 2-го порядка, < 0.4 – 3-го порядка. При анализе магнитного поля использован иной подход: выделялись отдельно локальные аномалии магнитного поля, как рядовые изометричные, так и высокоинтенсивные – > 3000 нТл. Кроме этого, на схеме распределения геофизических неоднородностей отражены оси локальных магнитных аномалий как протяжённые интенсивные, так и рядовые в рамках масштаба используемых карт. Для Кейвской зоны характерны региональные геофизические аномалии – отрицательная гравитационная и положительная магнитная. Причем границы зоны достаточно надежно выделяются в геофизических полях: (а) в гравитационном поле – градиентами поля Δg 1 и 2 порядка; (б) в магнитном поле – осями протяженных и интенсивных локальных аномалий.

Кейвская структура, в основном, вмещает архейские породы низкой плотности (граниты и гнейсы – $2.59\text{--}2.65$ г/см³, щелочные граниты – $2.60\text{--}2.63$ г/см³) [12]. Для структурных зон можно привести следующие интервалы изменения усреднённых значений петроплотностных характеристик: Верхнепонойский блок – $2.63\text{--}3.10$ г/см³; Большие и Центральные Кейвы – $2.65\text{--}2.75$ г/см³; Западные Кейвы, северная и восточная части Понойской зоны – $2.60\text{--}2.64$ г/см³; центральная часть Понойской зоны – преимущественно $2.63\text{--}2.66$ г/см³ [12]. На фоне отрицательного гравитационного поля имеются положительные локальные аномалии, охватывающие районы развития габбро-лабрадоритов, кейвских сланцев и метабазитов с повышенной плотностью – $2.80\text{--}3.10$ г/см³. В пределах Цагинского массива (габбро-лабрадоритовая интрузия, перспективная на титано-магнетито-ванадиевое оруденение) плотность титаномагнетитовых руд может быть намного выше, а среди кейвских сланцев есть разности с плотностью $2.67\text{--}2.75$ г/см³. В пределах структуры наиболее контрастно в гравитационном поле выражены массивы габбро-лабрадоритов и комплекс кейвских сланцев: границы характеризуются градиентами поля Δg 2-го порядка. Все наблюдаемые локальные аномалии гравитационного поля на территории блока совпадают с геологическими структурами, сложенными породами повышенной плотности. Таким образом, просматривается корреляция между полем Δg и петроплотностными характеристиками приповерхностных горных пород. Следовательно, можно допустить, что отрицательная гравитационная аномалия вызвана гранитами, гнейсами и щелочными гранитами, развитыми в районе.

В целом для Кейвской структуры типично слабоизрезанное положительное магнитное поле, за исключением центральной части, где присутствует высокоинтенсивное поле. Наиболее контрастно в магнитном поле выделяются массивы габбро-лабрадоритов при магнитной восприимчивости пород до $900 \cdot 10^{-6}$ СГС, здесь присутствуют титано-магнетитовые руды с магнитной восприимчивостью до $6000\text{--}16000 \cdot 10^{-6}$ СГС [12]. Для гранитов, гнейсов и щелочных гранитов приводятся значения магнитной восприимчивости в интервале $50\text{--}2000 \cdot 10^{-6}$ СГС, а для кейвских сланцев – $< 50 \cdot 10^{-6}$ СГС [12]. Комплексу кейвских сланцев свойственно спокойное магнитное поле, но на территории развития гранитов, гнейсов и щелочных гранитов существует изрезанное интенсивное положительное поле. Перечисленные породы не являются существенно магнитными и не могут обусловить формирование региональной магнитной аномалии в районе исследований. Следует отметить, что метаморфическая жизнь архейских комплексов структуры в целом связана с палеопротерозоем, и породы Кейв на тот период были неравномерно преобразованы в процессе ультраметаморфизма [8], что и наложило отпечаток на их петрофизические разности. Лебяжинский и Кейвский комплексы в пределах большей части территории Кейвского блока (Большие и Центральные Кейвы, Понойская зона, Малые Кейвы)

были метаморфизованы в условиях дистен-ставролитовой субфации. В зонах нахождения щелочных гранитов в Западных Кейвах и в обрамлении Кейвского блока метаморфизм на тот период достигал силлиманитовой субфации с развитием процессов мигматизации и щелочного метасоматоза. При этом в Западных Кейвах контактово-метасоматические воздействия щелочных гранитов на породы Лебяжинского и Кейвского комплексов проявились в региональном масштабе.

Магнитные свойства пород района в процессе гранитизации могли изменяться неравномерно: на средних уровнях гранитизации плагиогнейсов и гранодиоритов наблюдается возрастание магнитной восприимчивости от 100–200 до $1000 \cdot 10^{-6}$ СГС, а затем её снижение до уровня $30 \cdot 10^{-6}$ СГС [4]. На магнитные свойства пород также влияли наложенные процессы щелочного метасоматоза, который регионально проявлен в толще лебяжинских гнейсов, где магнитная восприимчивость пород на средних стадиях процесса может достигать $3000 \cdot 10^{-6}$ СГС, а на его конечных стадиях уменьшаться в 3–4 раза [12]. Таким образом, наблюдаемое региональное магнитное поле на территории Кейв в полной мере нельзя объяснить существующей намагничённостью поверхностных пород, так как петромагнитная карта района [12] на большей его части не соответствует характеру распределения магнитных аномалий. Не исключено, что существующие особенности регионального поля отражают как интенсивность намагничения глубинных слоёв земной коры, так и развитие процессов гранитизации и метаморфизма в её верхней части.

Массивы Цагинский, Щучьеозерский и Медвежьеозерский в силу своих больших размеров наиболее контрастно выделяются в геофизических полях и отличаются максимальными значениями магнитного и гравитационного полей (рис. 2). При этом область повышенных значений поля Δg и ΔZ перекрывает не только территорию Цагинского массива, но и простирается в северном, северо-восточном и восточном направлении. Аномальная область, перекрывающая Цагинский массив и протягивающаяся полосой в северо-восточном направлении, постепенно меняя направление на восточное, сливается с аномальной областью, перекрывающей Щучьеозерский и Медвежьеозерский габбро-лабрадоритовые массивы. Не исключено, что Цагинский массив продолжается далеко за пределы своих границ, устанавливаемых на эрозионной поверхности. Выделенные ослабленные зоны Цагинская и Щучьеозерская, пересекающиеся под углом в 70° (рис. 2), коррелируют с местоположением областей аномальных значений гравитационного и магнитного полей. Следовательно, эти зоны контролировали внедрение и формирование разновозрастных сближенных интрузивов – Цагинского, Щучьеозерского и Медвежьеозерского, которые сейчас могут представлять фрагменты первоначально крупного и сложного тела.

Выявленная конфигурация осей локальных магнитных аномалий в пределах Кейвской структуры (рис. 2) имеет сложный и неоднородный характер. В зависимости от ориентации осей выделяются отдельные области по однородности создаваемого рисунка, границы которых не совпадают с контактами известных структурных зон за исключением Верхнепонойского блока. В отличие от других зон в его пределах характер рисунка выдержанный: наблюдаются два сближенных купола изометричной формы, оконтуренные градиентами поля Δg 3 порядка и осями локальных магнитных аномалий. Видимо, эти купола отображают жесткий комплекс основания структуры, разбитый на два блока. Центральные Кейвы и Большие Кейвы имеют схожую структуру ориентации осей магнитных аномалий, непротяжённых и незначительно осложнённых складчатостью. При этом комплекс кейвских сланцев, протягивающийся от Западных Кейв по северной части Понойской зоны и по всей территории Больших Кейв, в магнитном поле не выражен, а его границы выделяются градиентами поля Δg .

Наиболее сложная схема ориентации осей магнитных аномалий присутствует в пределах Западных Кейвах: оси интенсивно сминаются в складки. Западные Кейвы в основном сложены щелочными гранитами, которые, как предполагается, первоначально имели пластовую форму

[8]. Центральная часть этих интрузий слабо магнитна, но породы в зоне эндоконтакта могут быть сильно магнитными [12]. Видимо, в пределах Верхнепонойского блока, Западных Кейв и Понойской зоны протяжённые магнитные аномалии, в основном, контролируются эндоконтактами щелочных гранитов. В пределах Больших и Центральных Кейв значительный вклад в повышение интенсивности магнитного поля внесли продукты гранитизации и щелочного метасамотоза кейвских гнейсов. По характеру распределения геофизических неоднородностей наименее однородной можно признать Понойскую зону, которая делится на 3 части: северная, центральная и восточная. Для центральной части зоны характерны протяжённые оси аномалий с запада на восток, а в северной и восточной частях – смятие в складки. Причем в северной части характер распределения осей магнитных аномалий схож с Западными Кейвами, и оси также образуют конформные очертания с выходами комплекса кейвских сланцев в этом районе. На территории Малых Кейв получена та же картина, что в восточной части Понойской зоны.

Как показывает анализ построенной схемы распределения геофизических неоднородностей (рис. 2), степень осложненности конфигурации осей магнитных аномалий коррелирует с распределением петроплотностных характеристик пород Кейвской структуры: чем плотнее порода, тем менее осложнена структура геофизических неоднородностей. Следовательно, наиболее стабильной структурой является Верхнепонойский блок, который реагировал на давление соседних структур как жёсткое тело. Большие и Центральные Кейвы в целом сохранили жёсткость, но их краевые части испытали складчатость и магматическую активизацию, что и демонстрируется на примере северо-западной и юго-восточной краевых частях комплекса кейвских сланцев. Реакция остальных, менее жёстких, участков земной коры Кейвской структуры (Западные Кейвы, северная и восточная части Понойской зоны) на напряженно-деформированное состояние среды проявилась в виде интенсивной складчатости, подтверждаемой сложной конфигурацией осей локальных магнитных аномалий.

В неорархее район Кейв особых дислокаций не претерпевал, но палеопротерозойский период развития Кольского региона отмечается формированием сводового поднятия коры, в пределах которого возникла интракратонная Печенга-Имандра-Варзугская рифтогенная система [1, 2]. Имандра-Варзугская структура, примыкающая к Кейвскому блоку с юга, составляет юго-восточный фланг рифтогенной системы. Возраст внедрения ассоциации габбро-лабрадоритов и щелочных гранитов (2.68–2.63 млрд лет [5]), реперной для условий геодинамического режима предрифтогенного сводообразования [2], дает основание полагать, что формирование свода, предопределившее начальный этап континентального рифтогенеза в Кольском регионе, началось в неорархее и охватило Кейвский блок. Результаты выполненного тектонофизического моделирования показывают, что в Кейвах на тот период создавались условия, при которых породы структуры были в меньшей степени подвержены тектоно-термальной переработке, так как возникающие скальвающие напряжения были незначительны [10, 11]. По геологическим данным, в районе для неорархее фиксируется размещение низкотемпературных метаморфических фаций неустановленного типа [8], это корреспондируется с результатами моделирования. Наиболее ранние структурные и метаморфические парагенезисы наблюдаются в породах Лебяжинского и Кейвского комплексов, а устанавливаемая по минеральным парагенезисам их структурно-метаморфическая история в основном относится к началу палеопротерозойского геотектонического периода [8]. На рис. 3 представлен обобщённый тренд термобарических условий метаморфизма в Кейвском блоке. Развитие региональных метаморфических процессов на всех стадиях тектоно-метаморфической истории супракомплекса происходило в кианитовом P-T-поле.

Геодинамический режим сумийского этапа рифтинга приводил к образованию различных по размеру и скорости прогибания грабенообразных впадин в пределах развития рифтогенной системы [1, 2]. Одновременно в Кейвском блоке формировалась вулканогенно-осадочная толща хребта Серповидный, породы которой сходны с ятулийскими образованиям Имандра-Варзуги. Складчатость в пределах Кейв на тот период формировалась в обстановке оседания свода,

что вызывало неравномерные радиальные подвижки блоков земной коры. Предполагаются достаточно кратковременные и интенсивные движения. Большую роль в этом процессе сыграли более стабильные, жёсткие и однородные участки земной коры как в пределах Кейвской структуры, так и на её контактах. Не исключено, что складчатый характер Западных Кейв и северной части Понойской зоны на тот период формировался на фоне относительного воздымания Верхнепонойского блока, так как в настоящее время на эрозионном срезе наблюдается нижняя расщеплённая часть Щучьеозерского и Медвежьеозерского габбро-лабрадоритовых массивов. Тектонические движения сопровождались вертикальными деформациями супракомплексов, что обусловило развитие геотермально-статического метаморфизма (начальный метаморфизм) [8].

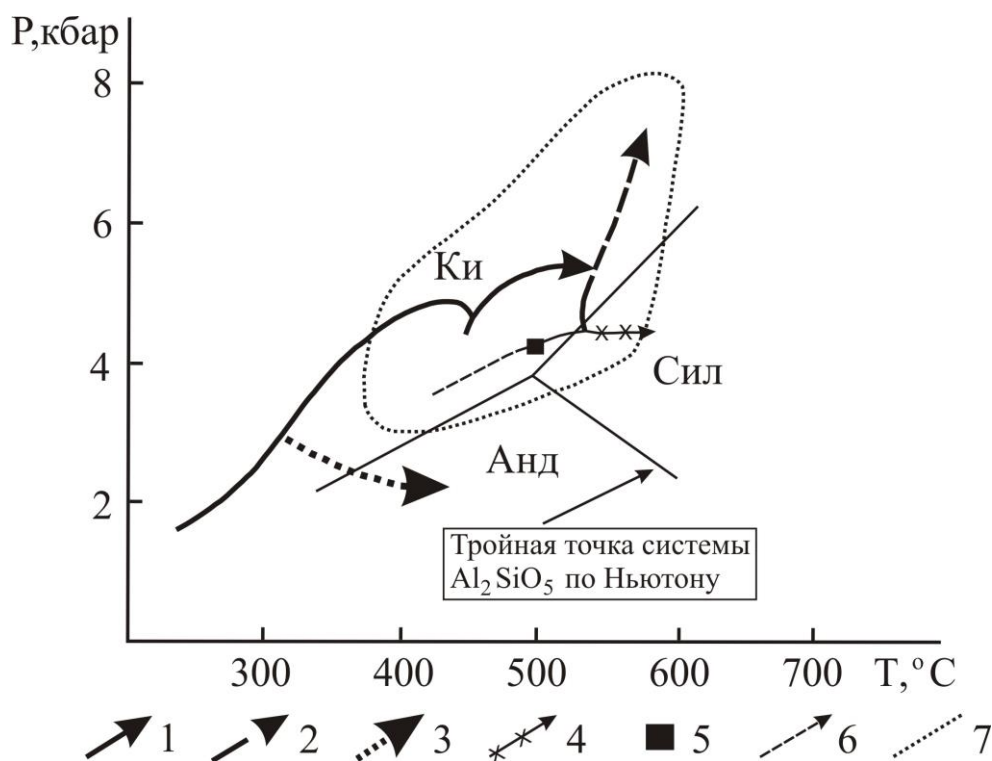


Рис. 3. Эволюция термодинамических условий метаморфизма пород Кейвского комплекса:

1 – прогрессивный метаморфизм, сопряжённый со складчатыми деформациями; 2 – метаморфизм в сдвиго-надвиговых зонах; 3 – андалузитовый порфиробластез; 4 – контактовый метаморфизм щелочных гранитов; 5 – амазонитовые пегматиты; 6 – регрессивный метаморфизм; 7 – поле P-T-оценок по гранат-биотит-плагиоклазовому геотермобарометру. Ки – кианит, Анд – андалузит, Сил – силлиманит

Кианитовые руды месторождения Кейв в большей мере появляются вследствие наложения различных по природе деформационных и метаморфических процессов. Так, уникальные, наиболее интересные в промышленном отношении конкреционные и тонкозернистые кианитовые руды формировались уже на начальных стадиях геотермального метаморфизма в условиях зеленосланцевой фации в обстановке доминирования радиального сжатия. В линейных зонах (по периферии структуры), контролируемых лишь пластовыми базитовыми интрузиями, развивались процессы андалузитового порфиробластеза. Следовательно, первая фаза складчатости и начальный метаморфизм в пределах структуры проходили синхронно

на фоне глыбово-волновых колебательных движений поверхности земной коры в сумийское время в период развития рифтового прогиба в Имандра-Варзугской системе.

Последующая активизация тектонических движений в регионе вследствие развития Печенга-Имандра-Варзугской рифтогенной системы сопровождалась последовательным переходом от существенно вертикальных к тангенциальным деформациям супракомплексов, что определило в Кейвах замену геотермально-статического метаморфизма геотермально-динамическим, а затем тектоническим. Некоторое снижение температуры в пределах эпидот-амфиболитовой низкотемпературной амфиболитовой фации предшествовало развитию северо-восточной фазы складчатости и связанному с ней метаморфизму (рис. 3). Следует отметить, что эта стадия в целом характеризуется прогрессивным трендом температуры и давления.

В свекофенский период (1.9–1.7 млрд лет назад) Кольский регион уже находился под влиянием интенсивных тангенциальных напряжений [1, 2], на этом фоне напряжения, естественно, не могли реализоваться в пределах Кейв равномерно из-за присутствия блоков с разным типом реакции на последующие деформации. Перестройка архейского структурного плана региона на тот период в первую очередь обусловлена наложением деформаций, проявившихся при сжатии. В зависимости от определённых факторов (векторы подвижек блоков коры, как контактирующих с Кейвской структурой, так и в её пределах; физические свойства ее отдельных блоков) геологические образования, различные по форме, положению в пространстве, размерам и физическому состоянию, реагировали дифференцированно на возникающее напряженно-деформированное состояние среды и подвергались неоднородным деформациям. Как следствие, имеет место неравномерное формирование структурных нарушений и их локализация в отдельных участках, а также латеральная неоднородность метаморфических преобразований. Метаморфические преобразования в породах Кейвской структуры, связанные с развитием надвиговых деформаций, непосредственно следовавших за кульминацией регионального метаморфизма, характеризуются повышенными давлениями (рис. 3). Однако имеются признаки как значительных вариаций давлений, так и декомпрессии (на примере зон порфиробластеза в отдельных структурах) [8]. Что касается щелочных гранитов, развитие контактово-метаморфических процессов происходило при более низких давлениях по сравнению с кульминацией регионального метаморфизма (рис. 3).

Развитие прогрессивного синтетектонического метаморфизма амфиболитовой фации, сопряженного с развитием северо-западной линейной складчатости в свекофенский период, а затем и формирование наложенных северо-западных складок обусловили перекристаллизацию ранних типов руд, укрупнение их зернистости, улучшение их технологических свойств. Перекристаллизация кианита вызвана прогрессивным изменением термодинамических условий метаморфизма, которые повсеместно проявились в регионе на данном этапе развития, сопровождаемом сдвиго-надвиговыми и разломными деформациями при захлопывании Имандра-Варзугского трога. В этот период породы Кейв претерпели второй этап складчатости и полный тектонометаморфический цикл преобразований. Завершающим стадиям тектонометаморфического развития Кейвского блока свойственно снижение температуры и давления, что было характерно и для всей Печенга-Имандра-Варзугской системы.

Выводы

Выполненное моделирование выявило, что области развития тектономагматической активности региона в архее и палеопротерозое коррелируют с местоположением ослабленных зон в фундаменте Кейвской структуры, выделенных по аномальным значениям рассчитанных скалывающих напряжений, возникающих в коре под воздействием удаленных сил и при условии, что земная кора северо-восточной части Балтийского щита развивалась в условиях внутриплитного режима. При этом четко прослеживается унаследованность положения магмапроводящих структур от архея до палеопротерозоя, что не противоречит имеющимся геологическим данным.

Характер распределения геофизических неоднородностей района показывает, что границы ранее выделенных структурных зон в пределах Кейв [1] зачастую разделяют однородные геологические комплексы, за исключением Верхнепонойского блока. По степени осложнённости конфигурации осей магнитных аномалий и их корреляции с петроплотностными характеристиками пород выделены две новые структуры, включающие в себя: 1) Западные Кейвы и северную часть Понойской зоны, 2) Малые Кейвы и южную часть Понойской зоны. В качестве Понойской зоны можно оставить только ее центральную часть.

Выполненная корреляция деформационных и метаморфических парагенезов указывает на то, что перестройка структурного плана и термодинамические режимы метаморфизма в Кейвской зоне были сопряжены с геотектоническим режимом развития Имандра-Варзугской структуры, являющейся восточным флангом рифтогенной системы Печенга-Имандра-Варзуга. Последовательное изменение тектонического режима и характера метаморфических процессов оказали существенное влияние на вещественный состав, строение и технологические свойства кианитовых руд месторождения Кейв.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Загородный В.Г., Радченко А.Т.* Тектоника раннего докембрия Кольского полуострова (состояние изученности и проблемы). Л.: Наука, 1983. 96 с.
2. Докембрийская тектоника северо-восточной части Балтийского щита (объяснительная записка к тектонической карте масштаба 1:500000) / *А.Т. Радченко, В.В. Балаганский, А.Н. Виноградов, Г.Б. Голионко, В.П. Петров, В.И. Пожиленко, М.К. Радченко.* СПб.: Наука, 1992. 111 с.
3. *Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield) / F.P. Mitrofanov, V.I. Pozhilenko, V.F. Smolkin, A.A. Arzamastsev, V.Ya. Yevzerov, V.V. Lyubtsov, E.V. Shipilov, S.B. Nikolaeva, Zh.A. Fedotov.* Apatity: KSC RAS, 1995. 144 p.
4. *Мирская Д.Д.* Супракрустальные формации Кейвской зоны // Геология и геохимия метаморфических комплексов Кольского полуострова. Апатиты: КФАН СССР, 1975. С. 23–35.
5. Каталог геохронологических данных по северо-восточной части Балтийского щита / *Т.Б. Баянова, В.И. Пожиленко, В.Ф. Смолькин, Н.М. Кудряшов, Т.В. Каулина, В.Р. Ветрин.* Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2002. 53 с.
6. *Балаганский В.В., Мыскова Т.А., Скублов С.Г.* О возрасте палеопротерозойской коллизии на юго-востоке Кольского региона, Балтийский щит // Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона: труды X Всерос. Ферсмановской науч. сессии, посвящённой 150-летию со дня рождения акад. В.И. Вернадского (Апатиты, 8–9 апреля 2013 г.) / Геологический ин-т КНЦ РАН. Апатиты, 2013. С. 13–16.
7. Геология и геохимия метаморфических комплексов раннего докембрия Кольского полуострова / *А.П. Белолипецкий, В.Г. Гаскельберг, Л.А. Гаскельберг, Е.С. Антонюк, Ю.И. Ильин.* Л.: Наука, 1980. 240 с.
8. *Петров В.П.* Метаморфизм раннего протерозоя Балтийского щита. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. 325 с.
9. *Филатова В.Т.* Мобильно-проницаемые зоны в фундаменте северо-восточной части Балтийского щита и условия их локализации // Геофиз. журн. НАН Украины. 2012. Т. 34, №1. С. 50–62.
10. *Филатова В.Т.* Формирование каркасных тектоногенов в северо-восточной части Балтийского щита // ДАН. 2014. Т. 455, № 4. С. 464–470.
11. *Filatova V.* Tectonophysical conditions of magma feeding channels formation in the Archaean basement of the north-eastern Baltic Shield // Proc. the 34th Intern. Geol. Congr. (5–10 August 2012, Brisbane, Australia). Brisbane, 2012. P. 2254.
12. *Верба В.В., Гаскельберг В.Г., Зайцев В.Г.* Петрофизическая характеристика докембрийских комплексов северо-восточной части Кольского полуострова // Петрофизическая характеристика советской части Балтийского щита. Апатиты: КФАН СССР, 1976. С. 34–38.

Сведения об авторах

Филатова Валентина Тимофеевна – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН; e-mail: filatova@geoksc.apatity.ru

Петров Валентин Петрович – д.г.-м.н., зам. председателя КНЦ РАН; e-mail: petrov@admksk.apatity.ru