

капусте и рапсе в полевых условиях, что наглядно видно на рассаде капусты (рис. 2). Результаты испытаний гуминовых препаратов на различных сельскохозяйственных культурах путем предпосевной обработки семенного материала и (или) двукратного полива (в зависимости от технических возможностей потребителя) приведены в табл. 3.

В заключение отметим, что по данным Федеральной целевой программы [6] на Дальнем Востоке производится лишь 42 % потребляемого продовольствия, площади сельскохозяйственных угодий по сравнению с 1990 г. сократились в 1,7 раза, площади пахотных земель сократились в 2,3 раза. С учетом вышесказанного, производство гуминовых веществ из бурых углей и их внедрение в сельское хозяйство позволит решить часть проблем как угледобывающей отрасли, так и агропромышленного комплекса не только Дальневосточного, но и других регионов России.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 9517-94. Угли бурые и каменные. Методы определения выхода гуминовых кислот. — М.: Изд-во стандартов, 1996.
2. Пат. 2174529 РФ. МКИ С 10 G 1/04, С 05 F 11/2. Способ получения гуминовых веществ / М.Д. Новопапин, М.И. Бычев, Г.И. Петрова, В.А. Михеев, Т.В. Москаленко; заявитель и патентообладатель — ИГДС СО РАН. — № 99122182, заявл. 22.10.1999; опубл. 10.10.2001. Бюл. № 28.
3. Перминова И.В., Жилин Д.М. Гуминовые вещества в контексте зеленой химии / Зеленая химия в России. — М.: Изд-во МГУ, 2004. — С. 146–162.
4. Российская угольная энциклопедия. В 3 т. Т. 1. — М.—СПб.: ВСЕГЕИ, 2004.
5. Угольная база России. Т. 5. Кн. 2: Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока России. — М.: Геоинформмарк, 1999.
6. Федеральная целевая программа «Экономическое и социальное развитие Дальнего Востока и Байкальского региона на период до 2018 года». — <http://minvostokrazvitiya.ru/upload/iblock/c31/fcp480update.pdf>

© Москаленко Т.В., Михеев В.А., 2015

Москаленко Татьяна Владимировна // labkiy@mail.ru
Михеев Валерий Александрович // labkiy@mail.ru

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.311:551.24(470.21)

Филатова В.Т. (Геологический институт КНЦ РАН),
Петров В.П. (КНЦ РАН)

СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ КЕЙВСКОГО БЛОКА ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Рассмотрены тектоно-структурные и пространственно-временные особенности формирования земной коры Кейвского рудного района, вмещающего ряд крупных месторождений и рудопроявлений. Определена структура геофизических аномалий, выявлены ее корреляционные связи с петрофизическими характеристиками пород и стадийностью проявления деформационных и метаморфических процессов. Установлено, что тектонические режимы и характер метаморфических процессов могли существенно влиять на вещественный состав, строение и промышленную значимость месторождений полезных ископаемых Кейвского блока. **Ключевые слова:** Кейвы, неоархей, палеопротерозой, Балтийский щит, геофизические поля, тектонические режимы, метаморфические процессы.

Filatova V.T. (Geological Institute KSC RAS), Petrov V.P. (KSC RAS)

STRUCTURAL AND MATERIAL HETEROGENEITY OF THE
KEIVY BLOCK FROM GEOPHYSICAL DATA

Tectonic and structural, as well as time-and-space features of the Earth's crust formation of the Keivy ore area accommodate a number of major deposits and ore occurrences have been considered. The structure of geophysical anomalies within the area has been defined; its relation with petrophysical properties of the rocks and staging of deformation and metamorphic processes has been identified. The results showed that the tectonic regimes and the nature of metamorphic processes could signifi-

*cantly affect the material composition, structure and commercial value of the Keivy block mineral deposits. **Key words:** Keivy, Neoarchaeon, Palaeoproterozoic, Baltic shield, geophysical fields, tectonic regimes, metamorphic processes.*

В пределах Кольского региона Кейвская структура является наиболее интересным геологическим объектом из-за наличия в ней своеобразных архейских комплексов пород, которые в пределах других структур региона не наблюдаются. На территории Кейвского блока известно немало месторождений и рудопроявлений индустриальных минералов и редкометалльного сырья. В силу всего этого Кейвы рассматриваются многими исследователями как особая структура докембрия Балтийского щита со специфическими чертами геологии, развития и строения земной коры. Задача выявления тектоно-структурных условий формирования и пространственно-временных закономерностей развития земной коры региона является весьма актуальной. Корреляционные связи между физическими характеристиками пород, геофизическими полями, геолого-структурными факторами, тектоникой и оруденением могут рассматриваться как информативный признак при выяснении условий рудообразования.

Геологические особенности района исследований. На территории северо-восточной части Балтийского щита в качестве главных структурных элементов выделяются архейские мегаблоки (области) — Мурманский, Кольский, Беломорский и Карельский, которые в своей взаимосвязи создают коллажное строение земной коры [5, 8, 12] (рис. 1). Современный структурный план региона в основном сформировался на завершающей стадии свекофенского тектогенеза, а его фундамент характеризуется сложной полициклической историей метаморфизма. Кейвский блок, встроенный в каркас Коль-

ского мегаблока, является структурным элементом второго плана и занимает особое положение не только из-за своего размера, но прежде всего из-за особенностей строения и состава пород [6, 12] (рис. 1). Кейвская структура ранее выделялась условно как область преимущественного развития пород определенного возраста. По мере изучения геологии и тектоники региона в пределах Кейв были выделены отдельные структурные зоны (Верхнепонойский блок, Пурначский блок, Западные Кейвы, Понойская зона, Центральные Кейвы, Большие Кейвы, Малые Кейвы) (рис. 2), границами которых являются, в основном, крутопадающие разрывные нарушения [5, 8].

Индивидуальное своеобразие рассматриваемой структуры заключается в широком развитии мощной толщи кислых вулканитов лебяжинского комплекса (нижний структурный ярус) и метаосадочных пород кейвского комплекса (верхний ярус). Первоначально U-Pb изохронный возраст метавулканитов (район Малых Кейв) был определен как 2871 ± 15 млн. лет и интерпретировался как время кристаллизации кислых вулканитов [2]. 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 [1]. По-видимому, возраст 2871 ± 15 млн. лет определяет время образования эффузивных протолитов пород нижнего структурного яруса. Сланцы верхнего яру-

са по особенностям химического состава относятся к образованиям осадочного чехла неoarхейской прото-платформы [5]. Комплекс кейвских сланцев, развитый преимущественно в пределах Больших Кейв и претерпевший многоэтапные тектоно-метаморфические преобразования, составляет уникальное по своим масштабам Кейвское месторождение высокоглиноземистого сырья, представленное углеродистыми кианитовыми сланцами.

Магматизм в пределах Кейв в неoarхейский период начинался с внедрения массивов габбро-лабрадоритов (Цагинский, Щучьеозерский, Медвежьеозерский, Ачинский) в период от 2,68 до 2,63 млрд. лет и завершился формированием тел щелочных и нефелиновых сиенитов (2,67–2,61 млрд. лет) [2]. Наиболее распространенными интрузивными породами в районе исследований являются щелочные граниты, возраст которых укладывается в интервал 2,67–2,63 млрд. лет [2]. Габбро-лабрадориты преимущественно развиты в пределах Верхнепонойского блока, а щелочные граниты, кроме упомянутого блока, также в пределах Западных Кейв и Понойской зоны. На севере Понойской зоны в районе хр. Серповидный среди архейских сланцев наблюдается незначительное распространение вулканогенно-осадочных пород, которые на структурно-формационном уровне коррелируются с образованиями варзугской серии в пределах Имандра-Варзугской рифтогенной структуры палеопротерозойского возраста,

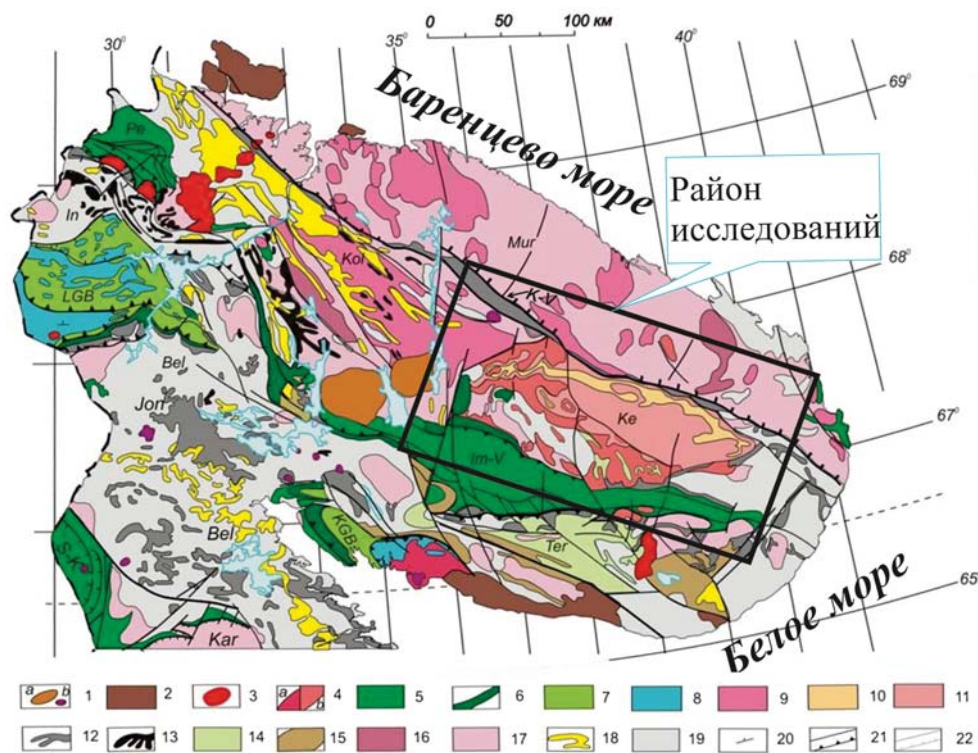


Рис. 1. Геолого-структурная карта Кольского региона Балтийского щита [12]. Области: Mur — Мурманская, Kol — Кольская, Bel — Беломорская, Ter — Терская, Ke — Кейвская, In — Инари, Kar — Карельская. Пояса: Jop — Енисейский, K-V — Колмозеро — Воронья (архейские зеленокаменные); LGB — Лапландский, KGB — Кандакшско-Колвицкий (гранулитовые); Pe — Печенга, Im-V — Имандра-Варзугский, S-K — Северо-Карельский (палеопротерозойские). 1 — контуры палеозойских интрузий (а — нефелиновые сиениты, б — щелочные ультрамафиты); 2 — осадочные породы верхнего протерозоя; 3–6 — палеопротерозой: 3 — граниты, гранодиориты и диориты, 4 — чарнокиты, граниты (а), щелочные граниты (в Кейвах — неoarхейские) (б); 5 — вулканогенно-осадочные породы; 6 — анортозиты, габбро-анортозиты (в Кейвах — неoarхейские), габбро, пироксениты, перидотиты; 7–8 — палеопротерозой (или неoarхей?): 7 — гранулиты основного и среднего состава, 8 — кислые гранулиты; 9–19 — неoarхей: 9 —

гранодиориты, диориты и эндербиты, 10 — глиноземистые и суперглиноземистые гнейсы и сланцы, 11 — кислые гнейсы, 12 — фрагменты зеленокаменных поясов (гнейсы, амфиболиты и метакоматиты), 13 — фрагменты железорудной (BIF) формации (гнейсы, амфиболиты и железистые кварциты), 14 — слюдяные, гранат-слюдяные парагнейсы и сланцы, 15 — гнейсы и амфиболиты, 16 — гранодиориты и диориты, 17 — плагиограниты и гранитогнейсы, 18 — кианит-гранат-биотитовые гнейсы, 19 — гранитогнейсы, гнейсы, мигматиты и редко амфиболиты; 20 — элементы залегания; 21 — субвертикальные разломы и пологие надвиги, разделяющие протерозойские структуры; 22 — субвертикальные разломы и надвиги

ограничивающей Кейвский блок с юга [3, 5, 8]. Непосредственно на контакте Кейвской и Имандра-Варзугской структур локализованы палеопротерозойские массивы основных—ультраосновных пород Федоровой и Панских тундр. В районе широко развиты редкометалльные пегматиты. U-Pb возраст пегматитов, пространственно ассоциирующих с массивами щелочных гранитов, определен как палеопротерозойский — 1682 ± 35 млн. лет [2].

Результаты тектонофизических исследований. В.Т. Филатовой впервые были выполнены исследования с использованием методов численного моделирования для объяснения динамики становления системы деформационно-магматических структур северо-востока Балтийского щита в раннем докембрии. Допускается, что тип тектоно-магматической активности, установившийся в раннем докембрии региона, был внутриплитный, а Кейвский блок развивался в условиях режима срединного массива начиная с мезоархей. Полагаем, что северо-восточная часть Балтийского щита на тот период представляла собой неоднородное упругое тело, подверженное действию объемных сил и заданных на-

пряжений 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 напряженно-деформированного состояния земной коры региона с учетом ее эволюционного развития решалась краевая задача в напряжениях [10].

При решении задачи были рассмотрены три временных этапа развития Кольского региона — мезоархей, неоархей и палеопротерозой; для каждого этапа задавалась определенная базовая модель, описывающая исследуемую область с учетом сформировавшихся к этому времени геологических структур. К началу неоархей консолидация земной коры превращает регион в относительно стабильную континентальную структуру, и исследуемая область на тот период находится в устойчивом состоянии [5, 8]. Следовательно, можно допустить, что регион при этом мог испытывать всесторон-

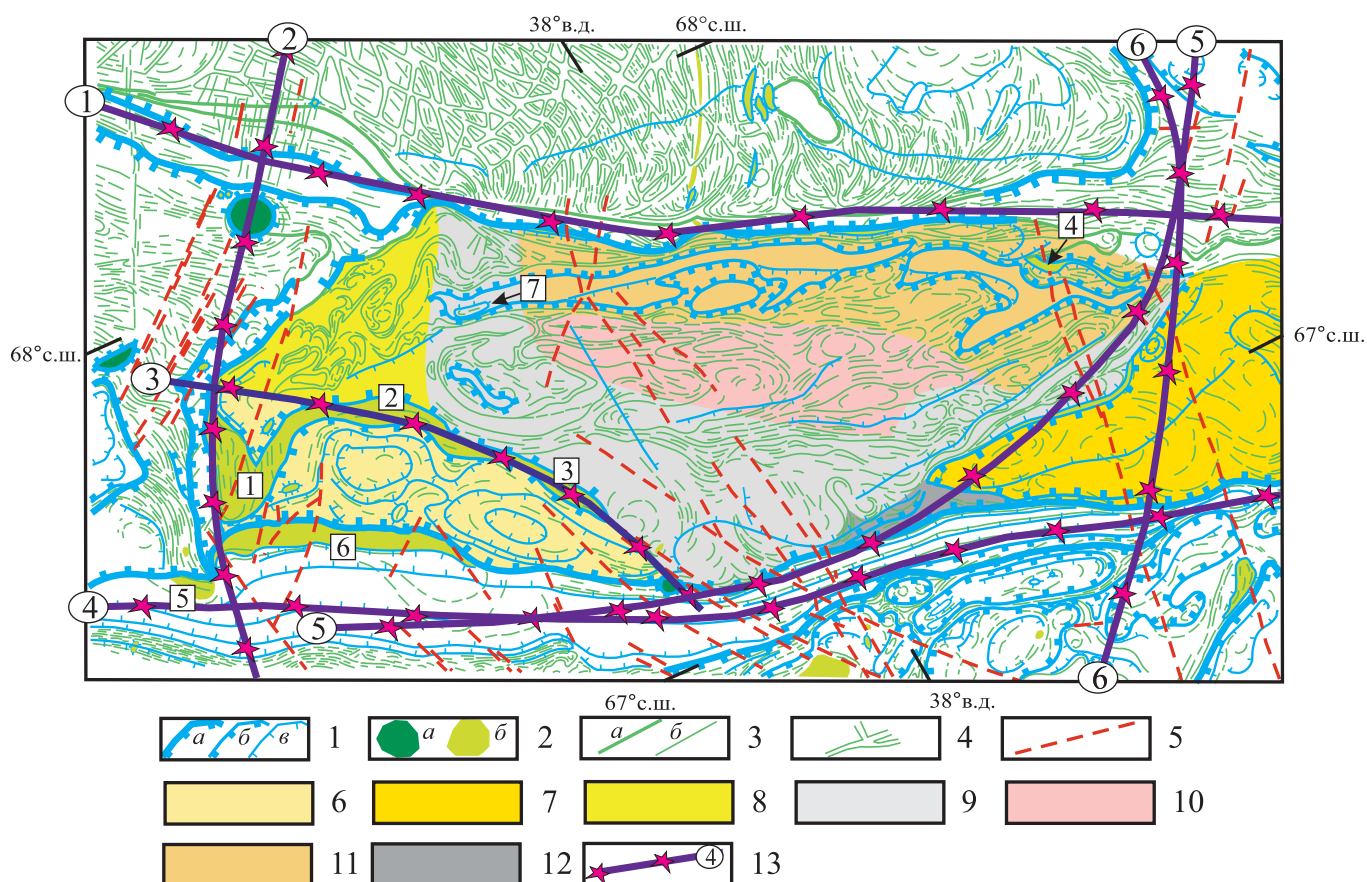


Рис. 2. Схема распределения геофизических неоднородностей в пределах Кейвской структуры и сопредельных территорий. 1 — градиенты гравитационного поля: а-в — соответственно I, II и III порядка; 2 — аномалии магнитного поля: а — локальные изометричные, б — локальные >3000 нТл; 3 — оси локальных магнитных аномалий: а — протяженных и интенсивных, б — рядовых (менее протяженных и менее интенсивных, но чаще наблюдаемых); 4 — секущие зоны пониженных значений магнитного поля (Мурманский блок); 5 — разрывные нарушения по геофизическим данным; 6-12 — структурные зоны (по данным [8]): 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. Массивы (цифры в квадратах): 1 — Цагинский, 2 — Щучьеозерский, 3 — Медвежьеозерский, 4 — Ачинский, 5 — Федоровы тундры, 6 — Панские тундры, 7 — хр. Серповидный

нее равномерное сжатие вследствие действия удаленных сил. В раннем протерозое основной фронт тангенциальных напряжений был направлен на северо-восток [5, 8]. При этом 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 распределенными усилиями с юго-запада и с северо-востока. В последующие эпохи значительных геолого-тектонических процессов регион не переживал. Таким образом, было принято два варианта нагрузки области: мезоархей и неоархей — всестороннее равномерное сжатие; палеопротерозой — одноосное сжатие по линии юго-запад — северо-восток [11]. Расчеты выполнялись для каждого рассмотренного этапа развития региона. В силу того что нет достоверных данных об абсолютной величине действовавших сил в регионе, принимаем их интенсивность равной единице. Для каждой базовой модели были рассчитаны максимальные по абсолютному значению скалывающие напряжения. Окончательно рассчитанные величины скалывающих напряжений нормировались и представлялись в процентном соотношении от максимального значения по региону, а по их аномальным значениям были выделены линейные зоны, интерпретируемые как ослабленные области в фундаменте, предопределившие локализацию магматических процессов в регионе.

Выполненные расчеты показали, что структурные особенности Кольского региона, обусловленные развитием проницаемых зон земной коры, отчетливо выделяются в поле скалывающих напряжений. Исследования с использованием базовой модели для мезоархея выявили линейные области в фундаменте Кейвского блока, которые сформировались в этот период предположительно как ослабленные: 1) обрамляющие Кейвскую структуру — Северо-Кольская, Цагинская, Терско-Аллареченская (Имандра-Варзугская); 2) в пределах структуры — Щучьеозерская (рис. 2). В неоархее к Цагинской и Щучьеозерской областям было приурочено внедрение комплементарной ассоциации габбро-лабрадоритов и субщелочных гранитов [2, 8]. Терско-Аллареченская ослабленная зона контролировала формирование одноименного архейского зеленокаменного пояса, местоположение которого в палеопротерозое унаследует Печенга-Имандра-Варзугская рифтогенная система. Расчеты для второй базовой модели (неоархей) позволили выявить Восточно-Кольскую ослабленную зону, обрамляющую Кейвы с востока, простирающуюся субмеридионально и секущую восточную оконечность Кольского полуострова и акваторию Белого моря (рис. 2). Эта зона не отмечается как магнапроводящая, но при этом сечет под углом 10° систему разломов (предположительно архейского возраста), представленную на тектонических схемах региона [5, 8].

Реконструкции напряженно-деформированного состояния коры для северо-востока Балтийского щита при принятых граничных условиях показали, что фундамент Кейв в неоархейское время не испытывал существенного воздействия скалывающих напряжений, в отличие от сопредельных территорий [9–11]. Согласно

имеющимся данным о палеотектонической зональности в Кольском регионе, район Кейв на тот период относился к слабо дифференцированной области и следов развития архейских зеленокаменных поясов в его пределах не наблюдается, в отличие от других районов региона [8]. Породы, слагающие фундамент, в неоархее претерпели синектонический метаморфизм высоких ступеней амфиболитовой и гранулитовой фаций, но при этом в пределах Кейвской структуры следов проявления указанного метаморфизма не отмечается [7]. Анализ схемы размещения фаций метаморфизма показывает, что породы лебяжинского комплекса в неоархее претерпели метаморфизм низкотемпературных фаций неустоенного фациального типа. Следовательно, на фоне стабилизации региона термодинамические обстановки формировались дифференцировано по отдельным структурным зонам, так же как и поля скалывающих 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 и в пределах Кейв, разграничивающая структурные зоны [5]. Наиболее интенсивно были деформированы шовные зоны, окаймляющие Кейвскую структуру, особенно в районе Малых Кейв, где наблюдается чешуйчато-блоковое строение [5, 8]. По аномальным значениям скалывающих напряжений отчетливо выделяется линейная зона Восточные Кейвы — Панаречка, протягивающаяся по контакту Кейвского блока с Пурначским блоком и поясом Имандра-Варзуга и охватывающая Малые Кейвы, рассматриваемая как мобильно-проницаемая зона, определившаяся в палеопротерозое (рис. 2). Кроме этого результаты тектонофизического моделирования показывают, что в этот период по периферии Кейвской структуры были ремобилизованы зоны, сформировавшиеся в архее как ослабленные — Северо-Кольская, Терско-Аллареченская и Восточно-Кольская (рис. 2). При этом последняя протягивается вглубь современной акватории Баренцева моря и на своем продолжении совпадает с восточным бортом Восточно-Баренцевоморской рифтовой системы палеозойского возраста.

Выделение геофизических неоднородностей и обсуждение результатов. Впервые выполненный авторами данной статьи 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 были использованы карты гравитационного и магнитного полей масштаба 1:200 000. 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 I порядка, 0,7–0,4 — II порядка, <0,4 — III порядка. При анализе магнитного поля был использован иной подход, при котором 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 протяженных и интенсивных, так и рядовых (менее протяженных и менее интенсивных, но чаще наблюдаемых) 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 I и II 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) [4]. Для структурных зон можно привести следующие интервалы изменения усредненных значений петроплотностных характеристик (г/см³): Верхнепонойский блок — $2,63\text{--}3,10$; Большие и Центральные Кейвы — $2,65\text{--}2,75$; Западные Кейвы, северная и восточная части Понойской зоны — $2,60\text{--}2,64$; центральная часть Понойской зоны — преимущественно $2,63\text{--}2,66$ [4]. На фоне отрицательного гравитационного поля выделяются 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 титаномагнетит-ванадиевое оруденение) плотность титаномагнетитовых руд может быть намного выше, а среди кейвских сланцев есть разности с плотностью $2,67\text{--}2,75$ г/см³. Границы массивов габбро-лабрадоритов и комплекса кейвских сланцев характеризуются градиентами поля Δg II 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 наблюдается 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, в пределах которых развиты титаномагнетитовые руды с магнитной восприимчивостью до $(60\,000\text{--}160\,000) \cdot 10^{-6}$ СГС [4]. Для гранитов, гнейсов и щелочных гранитов приводятся значения магнитной восприимчивости в интервале $(5\text{--}2000) \cdot 10^{-6}$ СГС, а для кейвских сланцев — менее $50 \cdot 10^{-6}$ СГС [4]. Для комплекса кейвских сланцев характерно 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 мо-

гут обусловить формирование региональной магнитной аномалии в районе исследований. Следует отметить, что метаморфическая жизнь архейских комплексов структуры в целом была связана с палеопротерозоем, и породы Кейв на тот период были неравномерно преобразованы в процессе ультраметаморфизма [7], что и наложило отпечаток на их петрофизические разности. Лебяжинский и кейвский комплексы в пределах большей части территории Кейвского блока (Большие, Центральные и Малые Кейвы, Понойская зона) 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 архейских гнейсов наблюдается возрастание магнитной восприимчивости от $(100\text{--}200) \cdot 10^{-6}$ до $1000 \cdot 10^{-6}$ СГС, а затем ее снижение по мере разуплотнения субстрата до уровня $30 \cdot 10^{-6}$ СГС [4]. На магнитные свойства пород также оказывали влияние 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 [4]. Таким образом, региональное магнитное поле на территории Кейв в полной мере нельзя объяснить существующей намагниченностью поверхностных пород, так как петромагнитная карта района [4] на большей его части не соответствует характеру распределения магнитных аномалий. Не исключено, что существующие особенности регионального поля отражают как интенсивность намагничивания глубинных слоев земной коры, так и развитие процессов гранитизации и метаморфизма в ее верхней части.

Массивы Цагинский, Щучьеозерский и Медвежьеозерский в силу своих больших размеров наиболее контрастно выделяются в геофизических полях и отмечаются максимальными значениями магнитного и гравитационного полей (рис. 2). При этом область повышенных значений полей Δg и ΔZ перекрывает не только территорию Цагинского массива, но и простирается в северном, северо-восточном и восточном направлениях. Кроме того, 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, устанавливаемые на эрозионной поверхности. Выделенные ослабленные зоны Цагинская и Щучьеозерская, пересекающиеся под углом в 70° (рис. 2), коррелируются 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 III порядка и осями локальных магнитных аномалий. Видимо, эти купола отображают жесткий комплекс основания структуры, разбитый на два блока. Центральные и Большие Кейвы имеют схожую структуру ориентации осей магнитных аномалий — они непротяженные и незначительно осложнены 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 Западных Кейвах — оси интенсивно сминаются в складки. Эта структура в основном сложена щелочными гранитами, которые, как предполагается, первоначально имели пластовую форму [8]. Центральная часть интрузий является слабомагнитной, но породы в зоне эндоконтакта могут быть сильномагнитными [4]. Видимо, в пределах Верхнепонойского блока, Западных Кейв и Понойской зоны протяженные 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 метасоматоза кейвских гнейсов. По характеру распределения геофизических неоднородностей наименее однородной можно признать Понойскую зону, которая делится на три части: северную, центральную и восточную. Для центральной части зоны типичны протяженные оси аномалий, ориентированные с запада на восток, а в северной и восточной частях — смятые в складки. При этом северная часть по характеру распределения осей магнитных аномалий схожа с Западными Кейвами, и оси также образуют конформные очертания с выходами комплекса кейвских сланцев в этом районе. На территории Малых Кейв наблюдается такая же картина, что и в восточной части Понойской зоны.

Как показывает анализ построенной схемы распределения геофизических неоднородностей (рис. 2), степень осложненности конфигурации осей магнитных аномалий коррелируется с распределением петрологических 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 жесткое тело. Большие и Центральные Кейвы в целом сохранили жесткость, но их краевые части испытывали складчатость и магматическую активизацию. Реакция остальных менее жестких 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 неоархее 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 [5, 8]. Имандра-Варзугская структура, примыкающая к Кейвскому блоку с юга, является юго-восточным флангом рифтогенной системы. Возраст внедрения ассоциации габбро-лабрадоритов и щелочных гранитов (2,68–2,63 млрд. лет [2]), реперной для условий геодинамического режима предрифтогенного сводообразования [8], дает основание полагать, что образование свода, предопределившее начальный этап континентального рифтогенеза в Кольском регионе, началось в неоархее 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 скалывающие напряжения были малы. По геологическим данным в районе для неоархее фиксируется размещение низкотемпературных метаморфических фаций неустойчивого типа [7].

Геодинамический режим сумийского этапа рифтинга привел к развитию различных по размеру и скорости прогибания грабенообразных впадин в пределах рифтогенной системы [5, 8]. Одновременно в Кейвском блоке формируется вулканогенно-осадочная толща хр. Серповидный, породы которой сходны с образованиями пояса Имандра-Варзуга. Складчатость в пределах Кейв на тот период генерировалась 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, жесткие и однородные участки земной коры как в пределах Кейвской структуры, так и на ее контактах. Не исключено, что складчатый характер Западных Кейв и северной части Понойской зоны на тот период создавался на фоне относительного воздымания Верхнепонойского блока, так как в настоящее время на эрозионном срезе наблюдается нижняя расщепленная часть Щучьеозерского и Медвежьеозерского габбро-лабрадоритовых массивов. Тектонические движения сопровождались вертикальными деформациями супракомплексов, что обусловило развитие геотермально-статического метаморфизма [7].

Кианитовые руды Кейвского месторождения в большей мере являются следствием наложения различных по природе деформационных и метаморфических про-

цессов. 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, наблюдаются признаки проявления 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 в процессе становления Печенга-Имандра-Варзугской рифтогенной системы сопровождалась последовательным переходом от существенно вертикальных к тангенциальным деформациям супракомплексов, что обусловило переход от геотермально-статического к геотермально-динамическому, а затем к тектоническому метаморфизму в пределах Кейв. В свекофенский период (1,9–1,7 млрд. лет) Кольский регион уже находился под влиянием интенсивных тангенциальных напряжений [5, 8], и 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 была обусловлена наложением деформаций, проявившихся при сжатии. В зависимости от определенных факторов (векторы подвижек блоков коры, как контактирующих с Кейвской структурой, так и в ее пределах; физические свойства ее отдельных блоков) геологические образования, различные по форме, положению в пространстве, размерам и физическому состоянию, реагировали дифференцировано на возникающее напряженно-деформированное состояние среды и подвергались неоднородным деформациям. И как следствие, имеет место неравномерное формирование структурных нарушений и их локализация в отдельных участках.

Проявление прогрессивного синтетектонического метаморфизма амфиболитовой фации, сопряженного с развитием северо-западной линейной складчатости в свекофенский период, а затем и формирование наложенных северо-западных складок, обусловило перекристаллизацию ранних типов руд, укрупнение их зернистости, улучшение технологических свойств. Перекристаллизация кианита вызвана прогрессивным изменением термодинамических условий метаморфизма, который повсеместно проявился в регионе на данном этапе развития, сопровождаемом сдвиго-надвиговыми и разломными деформациями при «захлопывании» Имандра-Варзугского трога в результате надвиговых движений. В этот период породы Кейв претерпели второй этап складчатости и полный тектоно-метаморфический цикл преобразований.

Выводы

Выполненное моделирование показывает, что области проявления тектоно-магматической активности региона в архее и палеопротерозое коррелируются 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 магмапродводящих структур от архея до палеопротерозоя, что не противоречит имеющимся геологическим данным.

Характер распределения геофизических неоднородностей района позволяет заключить, что границы ранее выделенных структурных зон в пределах Кейв [5] зачастую разделяют однородные геологические комплексы, за исключением Верхнепонойского блока. По степени сложности конфигурации осей магнитных аномалий и их корреляции с петроплотностными характеристиками пород выделяются 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 в большей степени контролировались геотектоническим режимом развития Имандра-Варзугской структуры, являющейся восточным флангом Печенга-Имандра-Варзугской рифтогенной системы. Последовательное изменение тектонического режима и характера метаморфических процессов оказали существенное влияние на вещественный состав, строение и технологические свойства кианитовых руд Кейвского месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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: Тр. X Всерос. Ферсмановской науч. сессии. — Апатиты: изд. ГИ КНЦ РАН, 2013. — С. 13–16.
2. Баянова Т.Б., Пожиленко В.И., Смолькин В.Ф. и др. Каталог геохронологических данных по северо-восточной части Балтийского щита. — Апатиты: изд. ГИ КНЦ РАН, 2002.
3. Белолипецкий А.П., Гаскельберг В.Г., Гаскельберг Л.А. и др. Геология и геохимия метаморфических комплексов раннего докембрия Кольского полуострова. — Ленинград: Наука, 1980.
4. 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: изд. КФАН СССР, 1976. — С. 34–38.
5. Загородный В.Г., Радченко А.Т. Тектоника раннего докембрия Кольского полуострова (состояние изученности и проблемы). — Ленинград: Наука, 1983.
6. Мирская Д.Д. Супракрустальные формации Кейвской зоны / Геология и геохимия метаморфических комплексов Кольского полуострова. — Апатиты: изд. КФАН СССР, 1975. — С. 23–35.
7. Петров В.П. Метаморфизм раннего протерозоя Балтийского щита. — Апатиты: изд. КНЦ РАН, 1999.
8. Радченко А.Т., Балаганский В.В., Виноградов А.Н. и др. Докембрийская тектоника северо-восточной части Балтийского щита (объяснительная записка к тектонической карте масштаба 1:500000). — СПб.: Наука, 1992.
9. Филатова В.Т. Мобильно-проницаемые зоны в фундаменте северо-восточной части Балтийского щита и условия их локализации // Геофиз. журнал 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 / Proceedings of the 34th International Geological Congress, 5–10 August 2012. — Brisbane, Australia, 2012. — P. 2254.
12. Mitrofanov F.P., Pozhilenko V.I., Smolkin V.F. et al. Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield). — Apatity: KSC RAS, 1995.

© Филатова В.Т., Петров В.П., 2015

Филатова Валентина Тимофеевна // filatova@geoksc.apatity.ru
Петров Валентин Петрович // petrov@admksk.apatity.ru

УДК 550.834.05

Романов В.В. (МГРИ-РГГРУ)

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ НА ПРИМЕРЕ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ОПОЛЗНЕВОГО СКЛОНА

*Рассматриваются основные приемы интерпретации данных малоглубинной сейсмической томографии на примере изучения оползневых склонов. На конкретном примере анализируются непрерывные распределения скорости продольных и поперечных волн, параметра добротности и анизотропии сейсмических свойств. По полученным данным выделяются признаки составляющих оползневого склона — геологических границ, плоскостей скольжения, блоков смещенных или деформированных пород и уровня грунтовых вод. **Ключевые слова:** инженерная сейсморазведка, интерпретация, метод преломленных волн, сейсмотомография, оползни.*

Romanov V.V. (MGRI-RGGRU)

INTERPRETATION OF SEISMIC TOMOGRAPHY FOR EXAMPLE STUDY THE GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE LANDSLIDE SLOPE

*The article discusses the basic techniques of data interpretation of near-surface seismic tomography in the study of landslide-prone slopes. In a specific example, analyzes a continuous distribution of velocities of primary and shear waves, Q -factor and anisotropy of seismic properties. The data obtained are features of the components of the landslide slope and geological boundaries, slip planes, blocks displaced or deformed rocks and ground-water levels. **Key words:** near-surface seismic, interpretation, method of the refracted waves, seismic tomography, landslides.*

Введение

Развитие оползней предопределяется геологическим строением древней Восточно-Европейской платформы. Из-за увлажнения перегруженные блоки грунтов верхней части геологического разреза смещаются вниз по склону без отрыва от неподвижного основания, образуя оползни. Долины современных и палеорек проходят в толще каменноугольных известняков, юрских глин и четвертичных отложений преимущественно ледникового происхождения. В пластичных юрских глинах с наклонной кровлей по ослабленным зонам развиваются инсеквентные оползни скольжения. Четвертичные отложения обычно характеризуются хорошей проницаемостью, и воды атмосферных осадков быстро достигают глинистых толщ, что вызывает избыточное увлажнение последних. Блоки четвертичных грунтов в период обильных осадков отрываются от ос-



Рис. 1. Стенка отрыва активного оползня

новой массы и соскальзывают по ослабленным поверхностям (зеркалам) вниз по склону. На поверхности при этом формируются циркообразные стенки отрыва с практически вертикальным профилем (рис. 1)

Мониторинг и прогнозирование оползневых процессов базируются на всестороннем анализе геологического строения склона, в чем немалую роль играют геофизические методы. Инсеквентные оползни наиболее сложны для геофизического изучения, т.к. дифференциация глинистых пород по физическим свойствам в пределах оползня и в ненарушенном массиве выражена недостаточно четко.

Одним из важнейших разделов инженерной геофизики является сейсморазведка, основанная на использовании искусственно возбуждаемых упругих волн. В малоглубинной инженерной сейсморазведке применяются слабые механические ударные источники с накоплением воздействий и расстановки приемников небольшой длины — от 50 до 100 м. Для более надежной интерпретации на одних и тех же профилях реализуются сейсмические методы продольных и поперечных волн. Для построения сейсмогеологических разрезов применяются обработанные сейсмограммы или выделенные на них годографы упругих волн. Сейсмические границы не всегда связаны с изменением литологии. Они могут проходить по уровню грунтовых вод, оконтуривать области разуплотнения или напряженного состояния блоков горных пород. Проведенная сейсморазведка при правильной геологической интерпретации помогает получить детальную картину формирования оползней на склонах и предсказать их дальнейшее развитие.

Предпосылки использования сейсмических методов

В настоящий момент установлено, что поверхности скольжения оползней выделяются по характерным изменениям сейсмических параметров горных пород. Деформация тела оползня при смещениях значительно изменяет его физические свойства по сравнению с ненарушенным массивом. Оползневое тело отличается анизотропией упругих параметров, что связано с трещиноватостью и является характерной особенностью оползневых массивов [1].

Сейсморазведка способна обнаружить и проследить те границы, которые отделяют слои горных пород (грунтов), отличающиеся значениями упругих модулей. На таких границах образуются преломленные и отраженные волны, регистрируемые на сейсмограммах. Возможность решения геологических задач сейсморазведкой на конкретном объекте определяется диффе-