



На правах рукописи

Мудрук Сергей Владимирович

**ГЛАВНЫЕ ЭТАПЫ
ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ
В КЕЙВСКОМ И СРЕЛЬНИНСКОМ ТЕРРЕЙНАХ
СЕВЕРО-ВОСТОКА БАЛТИЙСКОГО ЩИТА**

Специальность 25.00.01 – общая и региональная геология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Санкт-Петербург
2014

Работа выполнена в *Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Геологическом институте Кольского научного центра Российской академии наук* в лаборатории региональной геологии и геофизики, а также в *Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Мурманском государственном техническом университете* на кафедре геологии и полезных ископаемых.

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук

Балаганский Виктор Валентинович

ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН, заведующий лабораторией

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук

Мазукабзов Анатолий Муталибович

ФГБУН Институт земной коры СО РАН, ведущий научный сотрудник

доктор геолого-минералогических, профессор

Худoley Андрей Константинович

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный университет, заведующий кафедрой

Ведущая организация: ФГБУН Институт геологии Карельского НЦ РАН, г. Петрозаводск, лаборатория региональной геологии и геодинамики и лаборатория петрологии и тектоники

Защита состоится 16 апреля 2014 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д.002.047.01 при Институте геологии и геохронологии докембрия РАН по адресу: 199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГГД РАН и на сайте www.ipgg.ru.

Отзывы направлять ученому секретарю диссертационного совета по адресу: 199034 г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 2,
Электронная почта: dis.sovet@ipgg.ru; факс (812) 3284801.

Автореферат разослан 12 февраля 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат геолого-минералогических наук



/Т.П. Щеглова/

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. Классические палеопротерозойские породы северо-востока Балтийского щита представлены рифтогенными образованиями (тектонотип – палеорифт Печенга–Имандра-Варузуга; [Радченко и др., 1994](#); [Mitrofanov et al., 1995](#)). Они отличаются слабой структурной переработкой в условиях преимущественно зеленосланцевой амфиболитовой фации ([Петров и др., 1990](#)). Палеопротерозойская ювенильная кора островодужного типа выявлена только в ядре палеопротерозойского Лапландско-Кольского коллизионного орогена (ЛКО), где она слагает тектонические пластины, чередующиеся с пластинами архейской коры ([Балаганский и др., 2006](#); [Daly et al., 2006](#)). Эти образования глубоко метаморфизованы, сильно мигматизированы, испытали интенсивные деформации и до получения изотопных возрастов считались архейскими.

Анализ и корреляция структурно-метаморфических преобразований палеопротерозойских толщ Кейвского (СВ форланд орогена) и Стрельнинского (ядро орогена) террейнов, представляющих главные генетические типы пород (рифтогенные и островодужные с возрастом 2,1–2,5 и 1,95–2,0 млрд лет, соответственно), а также вмещающих их архейских толщ являются необходимыми для создания адекватной модели тектонического развития Кольского региона в палеопротерозое, а в конечном счете – и для понимания раннедокембрийской истории развития Земли.

Объекты исследования – палеопротерозойские деформационные структуры в рифтогенных толщах Кейвского террейна и в островодужных Стрельнинского террейна ЛКО.

Цели и задачи работы. Основная цель исследования заключалась в установлении структурных форм как в рифтогенных толщах северо-восточного форланда, так и в островодужных толщах ядра ЛКО, указывающих на их единую структурную эволюцию. Достижение этой цели будет способствовать созданию адекватной модели палеопротерозойской коллизионной тектоники в Кольском регионе. При этом решались следующие задачи: 1) сбор и систематизация данных по геологии и тектонике Кольского региона, а также по объектам исследования; 2) определение морфологии и внутреннего строения Серповидной структуры Кейвского террейна; 3) восстановление последовательности структурно-метаморфических событий в Стрельнинском террейне; 4) реконструкция кинематики движений для каждого этапа деформации; 5) корреляция деформационных событий в изученных участках форланда и ядра ЛКО.

Защищаемые положения:

1. *Серповидная структура (северо-западная часть Кейвского террейна) – это гигантская синформная колчановидная складка, палеопротерозойское ядро которой является ныряющей антиклиналью с пережатым лежащим крылом.*

2. *Серповидная колчановидная складка образовалась в северо-восточном форланде Лапландско-Кольского коллизионного орогена в условиях простого и/или общего сдвига при крупномасштабных надвиговых движениях с ЮЮЗ на ССВ.*

3. *Главные надвиговые движения в Стрельнинском террейне в период 1,97–1,92 млрд лет были направлены к ССВ и сменились транспрессионными движениями к востоку в период 1,92–1,90 млрд лет. Самые поздние структуры, в том числе сдвиговые зоны с золотоносной минерализацией, развивались 1,9 млрд лет назад в условиях субширотного растяжения.*

Установленные периоды главной и транспрессионной коллизии (соответственно, сжатие по линии ССВ–ЮЮЗ и сменившие его движения, субпараллельные простиранию главных структур сжатия) подтвердили представление о завершении в ЛКО коллизионных событий к рубежу 1,90 млрд лет (Мудрук, Балаганский, 2009; Балаганский, Мудрук, 2013). Это вводит возрастные ограничения на тектонические модели развития региона в палеопротерозое. Идея о том, что крупная колчановидная Серповидная складка в Кейвском террейне является частью тектонического покрова гельветского типа (Balagansky, Mudruk et al., 2012), получила дальнейшее развитие. Показано, что покровная тектоника в этом террейне по сути является альпинотипной тектоникой (Мудрук и др., 2013). Проведенные исследования свидетельствуют о единстве структурной эволюции Кейвского и Стрельнинского террейнов как составных частей СВ форланда и ядра ЛКО.

Научная новизна. На основании структурных наблюдений впервые показано, что палеопротерозойские рифтогенные породы хр. Серповидного и обрамляющие их кейвские парасланцы слагают гигантскую колчановидную складку, возникшую в результате надвигообразования в условиях пластического сдвигового течения с юга на север (Мудрук и др., 2013). Установлены главные черты структурнометаморфической эволюции и относительный возраст золотоносной минерализации в островодужных породах Стрельнинского террейна (Мудрук, Балаганский, 2009). Определен возраст дайки кварцевого метадiorита (1916 ± 10 млн лет), разделяющей в Стрельнинском террейне этапы главной и транспрессионной коллизии, что позволило, с учетом литературных данных, отнести эти события к периодам 1,96–1,92 и 1,92–1,90 млрд лет, соответственно (Балаганский, Мудрук, 2013).

Теоретическая и практическая значимость работы. Новые данные

о деформациях и кинематике движений дополняют шкалу последовательности эндогенных процессов в ЛКО. Это вместе с установлением гигантской Серповидной колчановидной складки обеспечивает дальнейшее развитие представлений о тектонике палеопротерозоя. Методика и результаты магнитной съемки могут быть учтены при крупномасштабном геологическом картировании Кейвского террейна. Установленный относительный возраст и структурный контроль золотоносной минерализации в Стрельнинском террейне могут быть использованы при поисковых работах. Практический интерес также представляет железная шляпа, выявленная на южном крыле Серповидной складки (Коган, Мудрук и др., 2011).

Фактический материал, методы исследования и личный вклад автора. В основе работы лежит авторский материал, собранный во время полевых работ 2004 г. в Стрельнинском террейне и 2006, 2007 и 2009–2011 гг. в Кейвском террейне. Большая часть структурных данных по Кейвскому террейну получена лично автором, меньшая была предоставлена В.В. Балаганским. При участии автора часть Серповидной структуры (6 км²) была покрыта магнитной съемкой по сети 25×5 м (магнитометр "МИНИМАГ"); на обнаженных участках проведена геологоструктурная съемка в масштабе от 1:100 до 1:1000. Автором проанализированы более 800 замеров структурных элементов; изучены 58 обычных и 7 больших шлифов, а также 10 аншлифов. В работе использованы данные силикатного химического анализа 21 образца пород (химлаборатория ГИ КНЦ РАН), изотопные U-Pb (ЦИИ ВСЕГЕИ) и Sm-Nd (ИГГД РАН) данные.

Для решения поставленных задач использовался кинематический, структурный и геометрический анализ (Turner, Weiss, 1963; Ramsay, Huber, 1983, 1987; Hanmer, Passchier, 1991) и петрографический метод. Характеристика колчановидных складок дана по методологии, изложенной в работах (Alsop, Holdsworth, 2004, 2006, 2012; Alsop et al., 2007). Для оценки глубины залегания и углов падения магнитных пород использовалась методика решения обратной задачи для поля модуля магнитной индукции (Раевский, 2008). Для реконструкции протолитов парапород привлекались диаграммы *FAK* А.А. Предовского (1980) и *ab* А.Н. Неелова (1980), а также геохимические диаграммы М. Херрона и Ф.Дж. Петтиджона (Herron, 1988; Pettijohn et al., 1972). Для оценки степени выветрелости протолита парапород рассчитывались индексы выветривания *CIA* (Nesbitt, Young, 1982), *CIW* (Harnois, 1988) и *PIA* (Fedo et al., 1995).

Апробация работы и публикации. Результаты исследований отражены в 4 статьях в журналах из перечня ВАК, в материалах конференций и тезисах докладов. Они были представлены автором на конференциях "Геология и полезные ископаемые северо-запада и центра России" (Петрозаводск, 2006, 2012; Апатиты, 2011) и "Современные проблемы магматизма и метамор-

физма" (С.-Петербург, 2012). Диссертант был также соавтором докладов, включавших результаты его исследований и представленных на российских и международных конференциях (33-я и 34-я сессии Международного геологического конгресса, Осло, 2008, Брисбен, 2012; V Всероссийская Ферсмановская научная сессия, Апатиты, 2008; "Гранит-зеленокаменные системы архея и их поздние аналоги", Петрозаводск, 2009; "Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов", Апатиты, 2009; "Craton Formation and Destruction with special emphasis on BRICS cratons", Йоханнесбург, 2012).

Объем и структура работы. Диссертация объемом 145 страниц состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 246 наименований, содержит 57 рисунков, 4 таблицы и 3 приложения.

Благодарности. Автор глубоко признателен своему научному руководителю В.В. Балаганскому за огромную помощь и поддержку, предоставленные материалы и открытие удивительного мира структурной геологии. Автор очень благодарен А.Б. Раевскому за постоянную поддержку, помощь и обеспечение геофизической части работы. Автор также искренне признателен П.Я. Азимову, А.А. Арзамасцеву, Ш.К. Балтыбаеву, О.А. Беляеву, В.В. Борисовой, Ю.Л. Войтеховскому, А.В. Волошину, Д.В. Жирову, Т.В. Каулиной, А.Б. Котову, П.В. Медведеву, Т.А. Мысковой, В.З. Негруце, В.И. Пожиленко, Т.В. Рундквист, С.Г. Скублову и И.В. Чикирёву за ценные советы, помощь и консультации. Первоначальный вариант рукописи был улучшен благодаря конструктивным замечаниям В.И. Пожиленко и П.В. Припачкина. Автор благодарен И.А. Горбунову за предоставленные материалы и содействие в работе, а также Е.А. Никитину за помощь в изучении осадочных текстур. Большую помощь в проведении полевых работ оказали Р.А. Елисеев и О.В. Рундквист, за что автор им искренне благодарен. Исследования получали финансовую поддержку РФФИ (грант № 09-05-00160-а), программы ОНЗ-6 и научной школы НШ-1413.2006.5 (рук. Ф.П. Митрофанов). Особую благодарность автор выражает Н.В. Кириченко за неоценимый вклад, поддержку и терпение.

ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ В РИФТОГЕННЫХ ТОЛЩАХ КЕЙВСКОГО ТЕРРЕЙНА

Кейвы считались областью, в которой наблюдается ненарушенный стратиграфический разрез раннего докембрия Кольского региона. Серповидная структура находится в СЗ части Кейвского парасланцевого пояса (на севере Кейвского террейна). Её ядро сложено вулканогенно-осадочными образованиями, коррелируемыми с породами умбинской свиты палеопротерозойского палеорифта Имандра-Варзуга (Белолипецкий и др., 1980), и обрамляется кейвскими парасланцами неясного возраста (AR или PR). Она считалась

простой синклиналию с глубиной кия ≤ 500 м (Бельков, 1963) и даже мульдой (Мирская, 1980), южное крыло которой срезано разломом (Сидоренко и др., 1972; Белолипецкий и др., 1980). А.Е. Милановский (1984) рассматривал эту структуру как набор тектонических пластин и чешуй.

Одной из причин разнообразия карт, стратиграфических схем и взглядов на строение Серповидной структуры является плохая обнаженность её палеопротерозойского ядра. Поэтому центральная и юго-восточная части структуры были покрыты магнитной съемкой по сети 25×5 м (рис. 1). Для установления взаимосвязи локальных магнитных аномалий и реальных геологических тел была проведена геологоструктурная съемка.

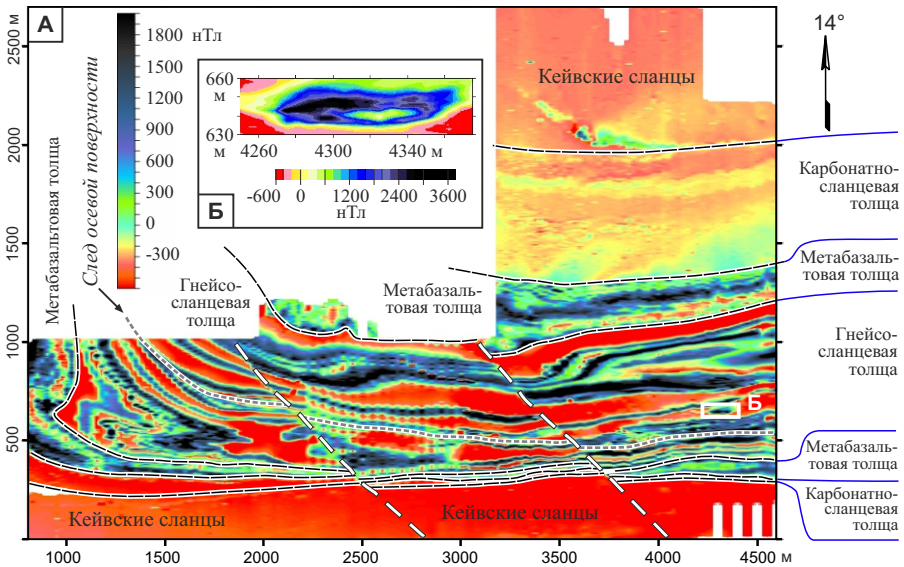


Рис. 1. Карты магнитных аномалий (сеть 25×5 м) центральной и юго-западной частей Серповидной структуры (А) и очковой магнитной аномалии (сеть $12,5 \times 1$ м), рассматриваемой как осложняющая колчановидная складка (Б) (Мудрук и др., 2013).

Геологическое картирование и магнитная съемка. Данные магнитной съемки и геологического картирования (рис. 2А) подтвердили, что палеопротерозойское ядро сложено тремя толщами: гнейсосланцевой, метабазальтовой и карбонатносланцевой. Они соответствуют верхней, средней и нижней подсвитам в работе (Белолипецкий и др., 1980) или южной, средней и северной толщам в работе (Балаганский и др., 2011). Оказалось, что южное

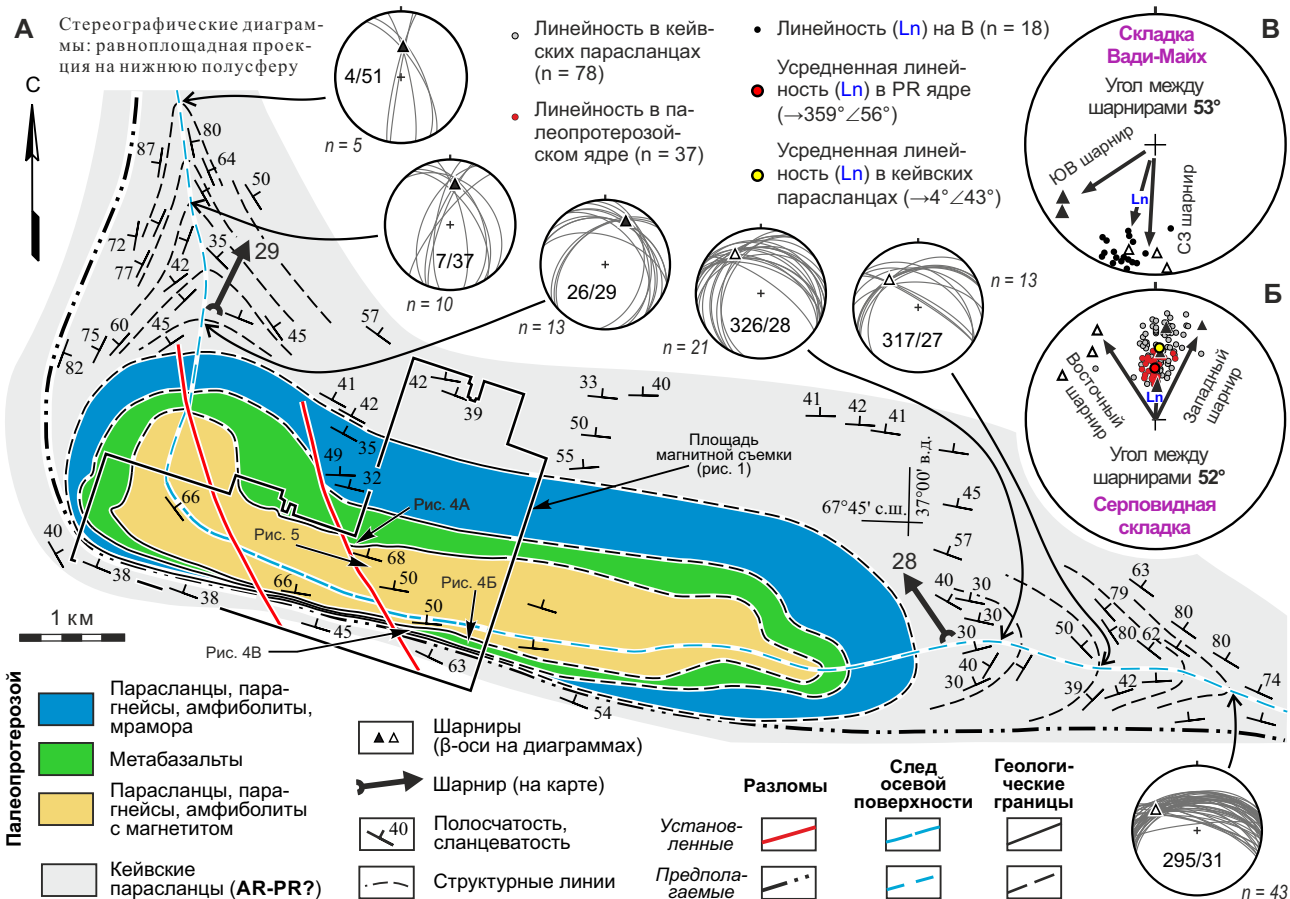


Рис. 2. (А) Геологическая карта района хр. Серповидного (Мудрук и др., 2013). Стереодиаграммы: (А) сланцеватость и полосчатость, (Б–В) шарниры складок и линейность в Серповидной складке (Б) и в крупной колчановидной складке в Оманских горах (В; Searle, Alsop, 2007).

крыло не срезано разломом, а очень сильно пережато. В итоге была составлена геологическая карта ядра Серповидной складки с надежно установленным следом осевой поверхности и границами всех трех толщ, почти полностью скрытыми под четвертичными отложениями (рис. 2А).

Морфология Серповидной структуры по структурным данным. Из-за плохой обнаженности палеопротерозойского ядра был проведен геометрический анализ ориентировок полосчатости и сланцеватости в кейвских парасланцах (верхняя часть пачки Д; Бельков, 1963), обрамляющих ядро. Как и палеопротерозойские породы, эти сланцы на южном крыле сильно раздавлены или же отсутствуют. За шарниры обоих замыканий ядра приняты шарниры, рассчитанные в структурногетогенных доменах, прилегающих к замыканиям (рис. 2А). Угол между шарнирами равен 52° , причем линейность во всех породах делит это угол примерно пополам (рис. 2Б), что характерно для колчановидных складок (рис. 2В). Восточное замыкание Серповидной складки – центриклинальное, тогда как западное – периклиналиное из-за изгибания в этой части складки осевой поверхности почти на 90° . Внутренняя часть ядра пережата: на северном крыле породы падают к ССВ под углами $30\text{--}50^\circ$, а на южном крыле и в центральной части – в том же направлении под углами $50\text{--}70^\circ$. По этим структурным данным, палеопротерозойское ядро Серповидной структуры является колчановидной синформой с длиной "колчана" ~ 5 км (рис. 3А). Так как кейвские парасланцы верхней части пачки Д тоже смяты в эту синформу, длина "колчана" всей структуры должна быть еще больше.

Геометрические параметры Серповидной колчановидной складки.

Для характеристики Серповидной колчановидной складки по методикам, описанным в работах (Alsop, Holdsworth, 2004, 2006, 2012; Alsop et al., 2007), были рассчитаны её геометрические параметры, позволяющие, в том числе, определить характер деформации, приведшей к образованию этой складки. У колчановидных складок выделяют три главные взаимно перпендикулярные оси: длинная ось x , промежуточная y и короткая z , по которым рассчитываются основные геометрические параметры складки. Эти оси в целом совпадают с осями X , Y и Z эллипсоида конечной деформации, причем ось x субпараллельна усредненной линейности (Quinquis et al., 1978; Minigh, 1979). Очковый узор колчановидной складки, образованный всеми смятыми в нее породами и наблюдаемый на плоскости yz , перпендикулярной оси x , является основой для расчета длины осей y и z .

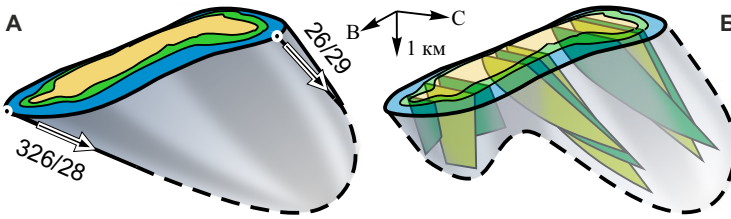


Рис. 3. Морфология палеопротерозойского ядра Серповидной структуры, реконструированная по структурным (А) и магнитным (Б) данным (Мудрук и др., 2013).

Очковый узор палеопротерозойского ядра Серповидной колчановидной складки образован всеми толщами ядра (рис. 2А) и обрамляющими кейвскими парасланцами, т.е. каждая толща – это маркёр колчановидной складки. За границы маркёра приняты внешняя и внутренняя границы толщи, и для каждого маркёра рассчитана истинная длина осей y и z . По размерам осей Серповидная складка входит в число самых крупных колчановидных складок мира. По показателю эллиптичности R_{yz} палеопротерозойское ядро относится к типу "кошачий глаз". Судя по степени эллиптичности R' , оно образовалась в результате простого сдвига или общего сдвига (комбинация простого и чистого сдвига). Образование колчановидного ядра в условиях простого сдвига подтверждается наличием индикаторов простого сдвига во всех деформированных породах (Горбунов и др., 2011; Мудрук и др., 2013). Различие в параметрах R' для маркёров, образованных палеопротерозойскими толщами ($R' = 0,62$), и кейвскими парасланцами ($R' = 1,21$), весьма существенное. Это может подчеркивать тектонический характер совмещения метаморфизованных палеопротерозойских рифтогенных пород ядра (Белолипецкий и др., 1980) с обрамляющими их слюдяно-кварцевыми, кианитовыми и ставролитовыми парасланцами без каких-либо следов вулканогенных пород (Бельков, 1963; Предовский, 1980).

Отличительной чертой Серповидной структуры является разная мощность её крыльев. Так, параметр T_z для карбонатсланцевой толщи – отношение мощности этой толщи на северном крыле к таковой на южном крыле, – составляет 47, для толщи метабазальтов – 38, а для гнейсосланцевой толщи – 6. Столь существенная разница мощности крыльев объяснялась либо осложняющей складчатостью на северном крыле (Бельков, 1963), либо срезанием южного крыла разломом (Белолипецкий и др., 1980). Расчет величины деформации метабазальтов на разных крыльях показал, что метавулканиды северного крыла почти не деформированы, тогда как на южном они сильно

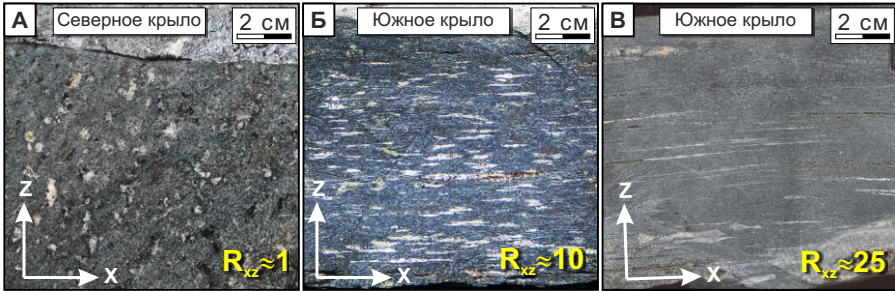


Рис. 4. Степень деформации метабазальтов в зависимости от их положения в Серповидной структуре: недеформированные (А), слабо (Б) и сильно (В) деформированные (Мудрук и др., 2013).

раздавлены и величина R_{xz} для них достигает 25 (рис. 4; Горбунов и др., 2011; Мудрук и др., 2013). Такие отношения мощностей крыльев и локализация деформации характерны для лежащих изоклиналих и сжатых складок в подошвах надвиговых пластин (Hanmer, Passchier, 1991; Searle, Alsop, 2007), включая гельветские покровы (Ramsay, 1981). В итоге образование Серповидной колчановидной складки связывается с развитием покрова гельветского типа, при этом ее нижнее крыло находится в подошвенной части покрова. Мысль о том, что породы палеопротерозойского ядра были тектонически перемещены из палеорифта Имандра-Варзуга в северную часть Кейвского террейна, уже высказывалась В.З. Негруцой (Негруца, Негруца, 2007).

Морфология Серповидной структуры по магнитным данным. Для оценки глубины залегания магнитных метабазальтовой и гнейсосланцевой толщ, углов их падения и общей морфологии палеопротерозойского ядра решалась двумерная нелинейная обратная задача для поля модуля магнитной индукции по методике, описанной в (Раевский, 2008; Балаганский и др., 2011). Построенная в конечном результате трехмерная модель (рис. 3Б) подтверждает вывод о том, что Серповидная структура является сильно сжатой колчановидной синформой. Длина "колчана" (ось x), образованного магнитными породами, достигает $\sim 4,5$ км. С учетом немагнитной карбонатносланцевой толщи, длина оси x всего палеопротерозойского ядра равна $\sim 5\text{--}5,5$ км. С глубиной осевая поверхность выполаживается. Согласно этой модели, палеопротерозойское ядро состоит из двух колчановидных складок – основной и дополнительной (рис. 3Б). В восточной части структуры коренных обнажений нет, поэтому структурные данные, подтверждающие наличие дополнительной складки, отсутствуют.

Синклиналь или антиклиналь? Надежная информация о положении кровли и подошвы пластов по первично-осадочным текстурам была получена

нами только для пород гнейсосланцевой толщи палеопротерозойского ядра. В породах этой толщи на почти недеформированном северном крыле наблюдались косая, градационная и параллельная слоистость, а также следы размывов. Во всех семи случаях эти первично осадочные текстуры указывают на нормальное залегание пород.

Дополнительно были изучены петрохимические особенности нормально залегающих ритмичнослоистых гранат-двуслюдяных парагнейсов. Ритмичная слоистость в этих гнейсах обусловлена чередованием слоев с плавным переходом от обогащенных кварцем (до 80%) разностей в приподошвенной части ритма к разностям с меньшим содержанием кварца (не более 50%) в прикровельной части, при этом граница между слоями резкая (мощность ритмов – 2–10 см). Обилие мусковита в прикровельной части делает её более лейкократовой по сравнению с приподошвенной частью.

Характер изменения химического состава парагнейсов внутри ритмов был оценен по степени выветрелости исходного кластогенного материала. Были рассчитаны химический индекс изменения *CIA* (Nesbitt, Young, 1982), химический индекс выветривания *CIW* (Harnois, 1988) и индекс изменения плагиоклаза *PIA* (Fedo et al., 1995). Оказалось, что в пределах каждого ритма степень выветрелости исходного кластогенного материала увеличивается снизу вверх, что согласуется с выводом о нормальном залегании пород.

На диаграмме А.А. Предовского (1980) фигуративные точки парагнейсов приподошвенной части ритмов легли в поля глинистых и высокоглинистых граувакк, а парагнейсов прикровельной части – в поля глин, причем от подошвы к кровле фемичность и глиноземистость пород возрастают. На диаграмме А.Н. Неелова (1980) фигуративные точки приподошвенных частей легли в поля полимиктовых песчаников, полимиктовых алевролитов и граувакковых алевролитов, а прикровельных – в поля граувакковых алевролитов и алевропелитовых аргиллитов. На диаграмме Ф. Петтиджона (Pettijohn et al., 1972) фигуративные точки парагнейсов из приподошвенных частей расположились в полях граувакк и литаренитов, а точки прикровельных частей – ниже и левее. На диаграмме М. Херрона (Herron, 1988) фигуративные точки парагнейсов приподошвенных частей попали в поле аркозов, а прикровельных – в поле вакк. На обеих диаграммах точки самых нижних и верхних частей ритмов образуют компактные поля, и намечаемая по ним тенденция изменения степени выветрелости согласуется с таковой на всех других диаграммах.

Таким образом, петрохимические данные для гранат-двуслюдяных парагнейсов указывают на увеличение степени глинистости исходного кластогенного материала от нижней части ритма к верхней. Это согласуется с положением подошвы и кровли ритмов, установленным по структурно-текстурным признакам, которые однозначно определяют нормальное залегание

ние пород. Магнитная съемка (рис. 1) и анализ обнажений не выявили в гнейс-сланцевой толще складок, которыми можно было бы объяснить нормальное залегание пород на фоне общего опрокинутого залегания.

Все данные по Серповидной структуре позволяют сформулировать первое и второе защищаемые положения:

1. Серповидная структура (северо-западная часть Кейвского террейна) – это гигантская синформная колчановидная складка, палеопротерозойское ядро которой является ныряющей антиклиналью с пережатым лежащим крылом.

2. Серповидная колчановидная складка образовалась в северо-восточном форланде Лапландско-Кольского коллизии орогена в условиях простого и/или общего сдвига при крупномасштабных надвиговых движениях с ЮЮЗ на ССВ.

ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ОСТРОВОДУЖНЫХ ТОЛЩАХ СТРЕЛЬНИНСКОГО ТЕРРЕЙНА

Серговская толща Стрельнинского террейна является гетерогенной, так как в её составе выявлены палеопротерозойские (Daly et al., 2001, 2006) и архейские (Астафьев и др., 2010) породы. Деформационные структуры и кинематика движений были изучены в палеопротерозойских амфиболитах и гнейсах района среднего течения р. Стрельна.

Последовательность деформаций и их кинематика. Были выделены 5 этапов деформации. На этапе **D₁** происходило рассланцевание и мигматизация амфиболитов и гнейсов в условиях амфиболитовой фации. На этапе **D₂** полосчатость и лейкосома этапа **D₁** были смяты в резко асимметричные складки **F₂**, причем нередко с криволинейными шарнирами (рис. 5). Крылья складок сорваны, при этом срывы – это надвиги, плоскости которых расположены (суб)параллельно осевым поверхностям складок. Плоскости надвигов часто маркируются лейкосомой с гранатом, следовательно, надвиги развивались в условиях высокой ступени амфиболитовой фации. Морфология и ориентировка складок **F₂** указывают на их образование в условиях горизонтального сжатия по линии ССВ—ЮЮЗ. С этапом **D₂** связываются крупные надвиги к СВ, отмеченные в работах (Беляев, 1980; Федоров и др., 1980).

Надвиговые складки **F₂** срезаны дайкой кварцевого метадiorита (рис. 6). Дайка рассланцована и мигматизирована, причём мигматитовая полосчатость смята в открытые асимметричные складки **F₃**. Их шарниры погружаются к северу (~360°) под пологими углами, а осевые поверхности под средними углами падают к ЗСЗ. На основании одинаковой кинематики движений (см. ниже), к этапу **D₃** также отнесены взбросы. Анализ структур этапа

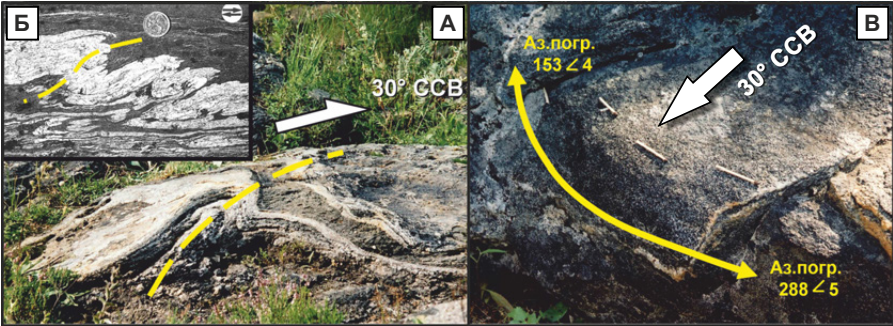


Рис. 5. Асимметричные складки с наклонными осявыми поверхностями как кинематические индикаторы надвиговых движений: складки F_2 (А) и классические надвиговые складки (Б; *Hanmer, Passchier, 1991*); (В) складка F_2 с криволинейным шарниром (спички параллельны шарниру) (*Мудрук, Балаганский, 2009*).

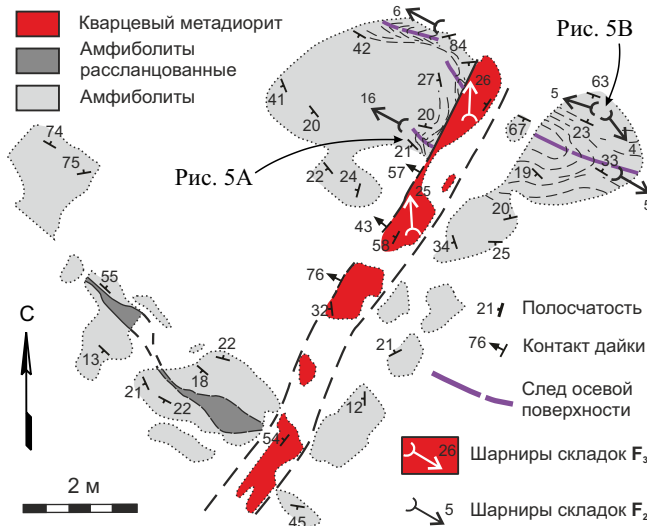


Рис. 6. Дайка кварцевого метадиорита, секущая смятые в складки F_2 амфиболиты (*Мудрук, Балаганский, 2009*).

D₃ показал, что они возникли при взбросовых движениях к востоку. Сжатие было косым по отношению к простиранию главных структур сжатия, поэтому этап **D₃** сопоставляется с этапом косо́го сжатия (транспрессии), сменившего главное ССВ сжатие в ЛКО (Балаганский, 2002).

Таким образом, дайка разделяет два главных этапа горизонтальной тектоники: ССВ сжатие и последующая транспрессия. Изотопный возраст кварцевого метадiorита равен 1916 ± 10 млн лет (U-Pb, SHRIMP II, циркон; Балаганский, Мудрук, 2013). Эта датировка вместе с другими возрастaми, обобщенными в работе (Балаганский, Глебовицкий, 2005), указывает на протекание главной коллизии (сжатие по линии ССВ–ЮЮЗ) в период 1,96–1,92 млрд лет, а транспрессии – в период 1,92–1,90 млрд лет.

Золотоносные сдвиговые зоны. В одном из обнажений на контакте гнейсов и амфиболитов выявлена сдвиговая зона с содержанием Au до ~2 г/т (Балаганский, Беляев, 2005). В гнейсах наблюдались s-образные изгибы, связанные со сдвиговыми зонами субширотного горизонтального растяжения, причем ориентировка оси растяжения близка к таковой этапа **D₄**. Поэтому был сделан вывод, что золотоносная сульфидная минерализация связана с этапом **D₄** (Мудрук, Балаганский, 2009).

Вся последовательность геологических событий приведена в таблице. В итоге **третье защищаемое положение** формулируется таким образом:

Главные надвиговые движения в Стрельнинском террейне в период 1,97–1,92 млрд лет были направлены к ССВ и сменились транспрессивными движениями к востоку в период 1,92–1,90 млрд лет. Самые поздние структуры, в том числе сдвиговые зоны с золотоносной минерализацией, развивались 1,9 млрд лет назад в условиях субширотного растяжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рифтогенных толщах Кейвского террейна (СВ форланд палеопротерозойской коллизионного ЛКО) установлена гигантская Серповидная колчановидная складка, представляющую собой *синформную антиклиналь*. Она возникла в подошвенной части покрова гельветского типа, выдвинутого к ССВ из палеорифта Имандра-Варзуга (перемещения – первые десятки км). В островодужных толщах Стрельнинского террейна (орогенное ядро) также выявлены надвиговые структуры, связанные с крупными надвигами преимущественно к ССВ. **Структурные формы, связанные с крупными надвигами, и определяют альпинотипный структурный стиль в обоих террейнах** (рис. 7). Обоснован рубеж в 1,92 млрд лет, разделяющий этапы главной и транспрессивной коллизии в Стрельнинском террейне. Все полученные

Таблица. Структурно-возрастная шкала для палеопротерозойских пород серговской толщи.

Этап	Главные геологические события	Возраст
D ₅	Растяжение С–Ю ; межбугорные складки и пережимы (<i>Qz+Pl</i>)	1896 ± 10 млн лет (Daly et al., 2006)
D ₄	Растяжение ЗЮЗ–ВСВ ; сбросы; сдвиговые деформации субширотного растяжения; s-образные изгибы и золотоносные сдвиговые зоны (<i>Amp+Bt+Pl+Qz</i>)	
D ₃	Косое сжатие (транспрессия), взбросы к В (<i>Amp+Bt±Grt+Pl+Qz</i>). Рассланцевание и мигматизация метадиорита	
Дайка кварцевого метадиорита		1916 ± 10 млн лет (Балаганский, Мудрук, 2013)
D ₂	Сжатие ССВ–ЮЮЗ , мигматизация вдоль надвигов (<i>Amp+Bt+Grt+Pl+Qz</i>)	
D ₁	Рассланцевание и мигматизация (<i>Amp+Bt+Grt+Pl+Qz</i>)	
Породы, исходные для палеопротерозойских гнейсов и амфиболитов серговской толщи		1,96–1,97 млрд лет (Daly et al., 2006)

результаты указывают на единство структурной эволюции Кейвского и Стрельнинского террейнов как составных частей СВ форланда и ядра ЛКО. Все они вводят строгие ограничения на тектонические модели развития Кольского региона в палеопротерозое.

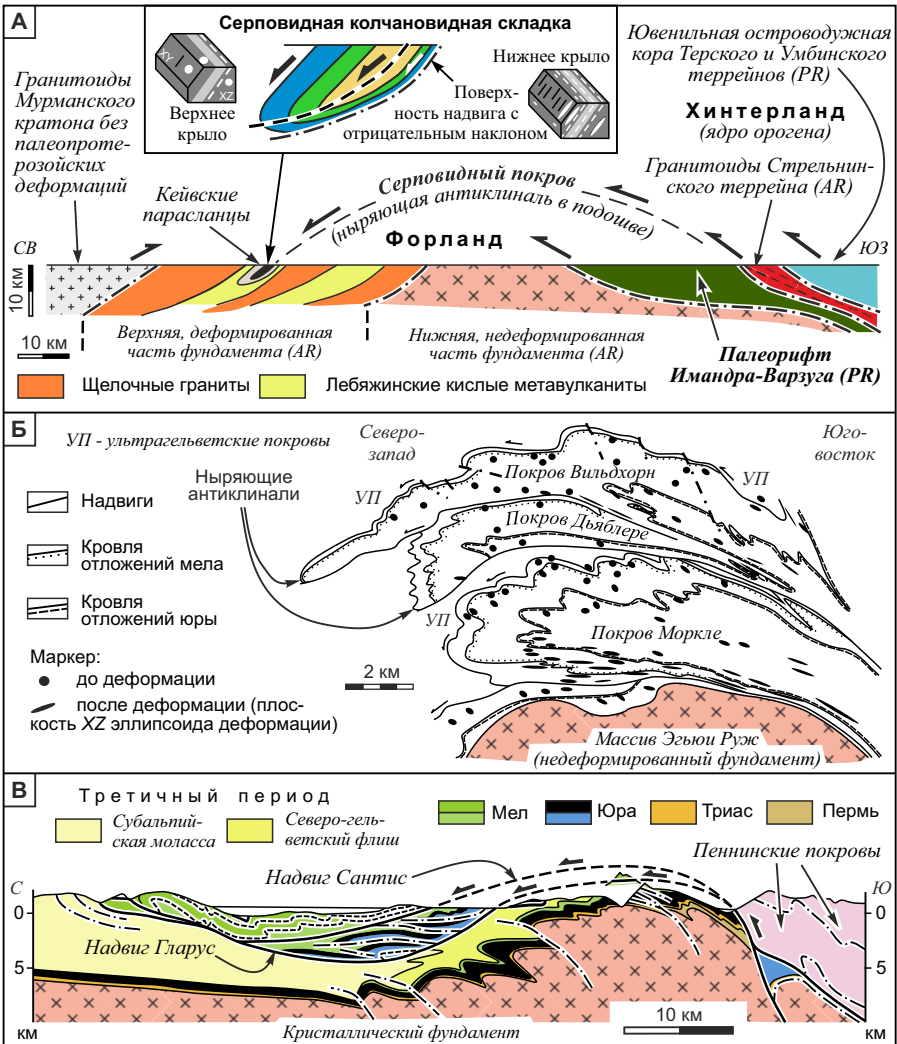


Рис. 7. (А) Предполагаемый схематический разрез через Кейвский террейн и прилегающие структуры; на врезке – обобщенный структурный разрез через Серповидную колчановидную складку. (Б–В) Разрезы через гельветские покровы: (Б) *Ramsay, 1981* и (В) *Pfiffner, 2005* (упрощено).

Список работ, опубликованных по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

Мудрук С.В., Балаганский В.В., Горбунов И.А., Раевский А.Б. Альпинотипная тектоника в палеопротерозойском Лапландско-Кольском орогене // *Геотектоника*. 2013. № 4. С. 13–30.

Balagansky V.V., **Mudruk S.V.**, Gorbunov I.A., Raevsky A.B. Tectonics of detached middle crust in the north-eastern foreland of the Palaeoproterozoic Lapland-Kola collisional orogen, north-eastern Baltic Shield // *Proceedings of the Murmansk State Technical University*. 2012. Vol. 15. No. 2. P. 300–310.

Балаганский В.В., Раевский А.Б., **Мудрук С.В.** Нижний докембрий Кейвского террейна, северо-восток Балтийского щита: стратиграфический разрез или коллаж тектонических пластин? // *Геотектоника*. 2011. № 2. С. 32–48.

Мудрук С.В., Балаганский В.В. Структурный анализ серговской толщи палеопротерозоя юго-востока Кольского полуострова, Балтийский щит // *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2009. Т. 12. № 3. С. 492–502.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации в прочих научных изданиях

Горбунов И.А., **Мудрук С.В.**, Балаганский В.В. Кинематика движений и величина деформации в палеопротерозойских породах Серповидной структуры (Кейвский террейн, северо-восток Балтийского щита) // *Геология и геоэкология: исследования молодых. Апатиты: К & М, 2011. С. 52–55.*

Мудрук С.В., Горбунов И.А., Балаганский В.В., Раевский А.Б. Анатомия гигантской колчановидной складки палеопротерозойской Серповидной структуры, Западные Кейвы, Кольский полуостров // *Современные проблемы магматизма и метаморфизма. Т. 2. СПб.: СПбГУ, 2012. С. 74–77.*

Балаганский В.В., **Мудрук С.В.** О возрасте палеопротерозойской коллизии на юго-востоке Кольского региона, Балтийский щит // *Геология и геохронология породообразующих и рудных процессов в кристаллических щитах. Апатиты: К & М, 2013. С. 13–16.*

Мудрук С.В. Палеопротерозойские деформации в Кейвском и Стрельнинском террейнах Лапландско-Кольского коллизионного орогена, северо-восток Балтийского щита // *Там же. С. 106–109.*