

На правах рукописи



**ВАСИЛЬЕВ Дмитрий Анатольевич**

**МЕЗОЗОЙСКО-КАЙНОЗОЙСКИЕ  
ДЕФОРМАЦИИ ОЛЕНЕКСКОГО, СЕВЕРНОЙ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ  
ЧАСТЕЙ ЗАПАДНО-ВЕРХОЯНСКОГО СЕКТОРОВ  
ВЕРХОЯНСКОГО СКЛАДЧАТО-НАДВИГОВОГО ПОЯСА:  
СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ  
ГЕОХРОНОЛОГИЯ**

Специальность 1.6.1 – Общая и региональная геология.  
Геотектоника и геодинамика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Якутск  
2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН).

**Научный руководитель:**

**Прокопьев Андрей Владимирович**, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией геодинамики и региональной геологии ИГАБМ СО РАН.

**Официальные оппоненты:**

**Булсов Михаил Михайлович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

**Диденко Алексей Николаевич**, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геологического института Российской академии наук (ГИН РАН, г. Москва).

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук (СВКНИИ ДВО РАН), г. Магадан.

Защита диссертации состоится «18» января 2024 г. в 14 ч. 00 мин на заседании диссертационного совета 24.1.062.02 при Институте земной коры СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗК СО РАН и на сайте <http://earth.crust.irk.ru/images/upload/newsfull247/4023.pdf>

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета к.г.-м.н. Б.С. Данилову по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, или e-mail: boris@crust.irk.ru.

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат геолого-минералогических наук



Б.С. Данилов

**Актуальность исследования** обусловлена необходимостью расширения представлений о строении и истории формирования геологических структур арктических и субарктических территорий России и совершенствования модели геодинамического развития Северо-Восточной Азии в мезозое и кайнозое, создания геологической основы для наращивания и освоения минерально-сырьевых и углеводородных ресурсов региона. Проблема изучения складчато-надвиговых структур в связи с этим имеет особое значение. Исследования последних лет позволили получить новые данные по стратиграфии, палеонтологии, бассейновому анализу и тектонике северо-востока Сибирской платформы и ее складчатого обрамления, смежных орогенных поясов и шельфа моря Лаптевых. Однако в силу удаленности и труднодоступности, сложности геологического строения изученность территории остается недостаточной. Многие вопросы, касающиеся тектонического строения, мезозой–кайнозойской истории геологического развития, тектоники и геодинамики остаются открытыми: стиль, последовательность и время проявления тектонических деформаций, возрастные рубежи тектонических подъемов, глубинное строение, величина эрозийного среза, история тектонического развития в контексте с геодинамической эволюцией смежных орогенных поясов и Сибирской платформы. Об этапах роста и денудации горных сооружений Северного Верхоянья есть лишь общие представления. Появление новых методов исследования способствует получению нового фактического материала и возможности переинтерпретации существующих моделей, а использование современных методов абсолютной геохронологии, особенно развивающихся в последнее время методов низкотемпературной термохронологии, наряду с традиционными методами структурного анализа является новым подходом к изучению сложно построенных тектонических структур с многоэтапной историей развития. Правильное понимание структурной характеристики территории важно для оценки ее рудного потенциала. Таким образом, проведение исследований имеет и прикладное значение для экономической и сырьевой безопасности и освоения арктической зоны Российской Федерации.

**Цель исследований** – установление основных закономерностей тектонического строения и мезозой–кайнозойской эволюции фронтальных складчатых структур северной части Верхоянского складчато-надвигового пояса (ВСНП) и прилегающих Лено-Анабарского и Приверхоянского прогибов и корреляция структурно-тектонических событий.

**Задачи:** 1. Структурный анализ складчатых и разрывных деформаций с выделением структурных парагенезисов и установлением их кинематики. 2. Тектонофизический анализ с целью реконструкции полей тектонических напряжений и расчета ориентировок главных осей сжатия и растяжения. 3. Установление возраста и последовательности формирования

деформационных структур. 4. Проведение трекового датирования апатитов, изотопной термохронологии и геохронологии; установление основных временных интервалов тектонических поднятий различных частей фронта ВСНП, связанных с заключительными стадиями формирования складчато-надвиговых структур. 5. Проведение сравнительного анализа тектонических структур различных частей фронта ВСНП.

**Объекты исследования:** 1. Центральная часть Усть-Оленекской системы складок Оленекского сектора ВСНП и прилегающих районов Лено-Анабарского прогиба. 2. Северный фланг Хараулахского сегмента Западно-Верхоянского сектора ВСНП и прилегающая часть Приверхоянского краевого прогиба. 3. Центральная часть Куранахского сегмента Западно-Верхоянского сектора ВСНП.

**Методологическая основа и методы:** 1. Обработка замеров ориентировки плоскостных и линейных деформационных образований, малых структурных форм и наложенной складчатости с целью выявления разновозрастных структурных парагенезисов выполнена на основе современных методов структурного и геометрического анализов и обработки данных в компьютерных программах (Stereonet, QuickPlot) и с использованием метода сбалансированных разрезов. 2. Реконструкция полей тектонических напряжений и расчеты ориентировок осей сжатия и растяжения по массовым замерам сместителей разломов и штриховок на зеркалах скольжения выполнена с помощью тектонофизических методов кинематического анализа (компьютерная программа FaultKinWin). 3. При определении последовательности формирования деформационных структур различных сегментов ВСНП использовались методы изотопного датирования (U-Pb и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) (обработка данных в программе Isoplot 4.0), низкотемпературной термохронологии (метод трекового датирования апатитов – AFT) (обработка данных в программах AFTSolve, HeFTy, RadialPlottersoftware, QTQt) и (U-Th)/He изотопии (ZHe).

**Фактический материал и личный вклад автора.** В основу диссертационной работы положены материалы, полученные в процессе полевых работ и проанализированные автором в период с 2007 по 2021 гг. Наблюдения проведены в 226 точках в 15 доменах. Замерено около 10000 ориентировок плоскостных и линейных структурных элементов, в дальнейшем обработанных в программах Stereonet, QuickPlot и FaultKinWin; уточнены и созданы 47 карт различного масштаба, построены и детализированы 35 геологических разрезов, изменены и дополнены 17 стратиграфических колонок, построены 29 схем, 182 диаграммы и графика и более 500 стереограмм. Использованы коллекции образцов, собранные как лично автором, так и предоставленные научным руководителем А.В. Прокопьевым, а также В.Б. Ершовой и Г.Г. Казаковой.

Отобрано 613 образцов из терригенных и магматических разновозрастных пород, проведена пробоподготовка, изготовление 35 специализированных шашек для трекового датирования. Автор принимал участие в проведении трекового датирования, проводил подсчет треков и замер их длины, обрабатывал результаты в программах AFTSolve и HeFTy для получения достоверных графиков термальной эволюции. Им была выполнена комплексная обработка и интерпретация полученных аналитических данных, сформулированы основные научные выводы и защищаемые положения.

#### **Защищаемые положения.**

1. Установлены позднемезозойские – кайнозойские этапы тектонических деформаций на севере Верхоянского складчато-надвигового пояса и их последовательность: в Оленекском секторе два этапа – ранний складчато-надвиговый в две стадии и поздний растяжения; в Хараулахском сегменте четыре этапа – три складчато-надвиговых и поздний растяжения; в Куранахском сегменте два этапа – ранний складчато-надвиговый и поздний сдвиговый.

2. Методами низкотемпературной термохронологии AFT и (U-Th)/He установлены основные временные интервалы тектонических поднятий различных частей ВСНП и их связь с проявлениями выделенных этапов и стадий деформаций: раннеюрский (~190–171 млн лет), позднеюрско-раннемеловой (~148–117 млн лет – этапы  ${}^{\text{O}}\text{D}_1^1$ ,  ${}^{\text{X}}\text{D}_1$ ,  ${}^{\text{K}}\text{D}_1$  и  ${}^{\text{K}}\text{D}_2$ ) и позднемеловой (~95–90 млн лет – этап  ${}^{\text{X}}\text{D}_2$ , ~86–75 млн лет – этап  ${}^{\text{O}}\text{D}_1^2$ , ~75–61 млн лет – этап  ${}^{\text{X}}\text{D}_3$ ).

3. Мощность эродированных пород увеличивается от Сибирской платформы в восточном и северном направлении в сторону складчатых областей. В центральной части Лено-Анабарского и на севере Приверхоянского прогиба величина денудации 2–3,3 км, в прилегающих частях Усть-Оленекской системы складок и Хараулахского сегмента свыше 4 км, а в тылу Хараулахского сегмента – более 6 км. Наиболее высокая рассчитанная скорость денудации пород по интерпретации графиков термальной эволюции установлена в центральной части Усть-Оленекской системы складок (остывание на 15°C/млн лет ~65–60 млн лет назад и остывание на 5–9°C/млн лет ~195–185 млн лет назад), а также на севере Хараулахского сегмента (остывание на 10°C/млн лет ~60–50 млн лет назад).

4. Проведена корреляция мезозойских и кайнозойских деформационных и термальных событий на севере и в центральной части Верхоянского складчато-надвигового пояса со смежными регионами Новосибирско-Чукотского и Таймыро-Североземельского орогенных поясов и рифтогенными структурами на шельфе моря Лаптевых. Прослежена связь изученных деформационных структур со следующими

геодинамическими событиями – коллизией Сибирского кратона и Колымо-Омолонского супертеррейна, столкновением Сибирского кратона с микроконтинентом Арктическая Аляска-Чукотка и раскрытием Евразийского океанического бассейна.

**Научная новизна.** Полученные данные существенно дополнили уже имеющиеся представления об истории геологического развития северной части ВСНП. 1. Впервые для изученных регионов расшифрована кинематика складчатых и разрывных деформаций; выделены структурные парагенезы. 2. Установлен возраст и уточнена последовательность формирования деформационных структур. 3. Впервые реконструированы поля тектонических напряжений и рассчитаны ориентировки главных осей сжатия и растяжения. 4. Впервые проведено трековое датирование апатитов, по данным которого, а также (U-Th)/He анализа и изотопной геохронологии впервые установлены основные временные интервалы тектонических поднятий различных частей фронта ВСНП, связанных с выделенными этапами деформаций. 5. Впервые проведена корреляция тектонических и термохронологических событий, сравнительный анализ тектонических структур различных частей фронта ВСНП.

**Практическая значимость.** Получены результаты об истории геологического развития территории, перспективной на обнаружение стратегически важных в современных реалиях различного вида твердых полезных ископаемых и углеводородов. Установление закономерностей строения отдельных тектонических структур и мезо–кайнозойской тектонической эволюции этих частей Арктики и Субарктики, в том числе прилегающих к арктическому шельфу, позволило как расшифровать структурное положение Ag-полиметаллических рудных объектов (Мангазейский рудный узел Куранахского антиклинория), так и способствует созданию геологической основы для адекватной интерпретации строения акустического фундамента и осадочного чехла мезо–кайнозойских бассейнов седиментации шельфа моря Лаптевых. Таким образом, проведенные исследования имеют стратегическое значение для экономической и сырьевой безопасности, освоения арктической зоны Российской Федерации. Новые данные могут быть использованы при создании геологических и тектонических карт нового поколения.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Результаты работы соответствуют паспорту научной специальности 1.6.1. «Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика» и пунктам № 1, 3, 6, 7, 8, 12, 15.

**Апробация результатов диссертации.** Международная конференция «The Polar Petroleum Potential» (Ставангер, Норвегия, 2013); XII Международный симпозиум студентов и молодых ученых (Томск, 2008);

IV, V, VII Сибирская международная научно-практическая конференция (Новосибирск, 2008, 2010, 2014); I и IV Международная научно-практическая конференция (Санкт-Петербург, 2009, 2015); Всероссийская конференция «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России» (Якутск, 2012–2019, 2023); X и XVII Всероссийское научное совещание «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса» (Иркутск, 2012, 2019); XXVI Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2015); Конференция «ЭРЭЛ-2009» (Якутск, 2009); Региональная научно-практическая конференция «Проблемы геологии и разведки недр Северо-Востока России» (Якутск, 2011).

Работа выполнена по плану НИР ИГАБМ СО РАН, а также поддержана грантами РФФИ (№ 07-05-00743, 13-05-00700, 14-05-31298\_мол\_a) и РНФ (№ 20-17-00169).

**Публикации.** Опубликовано 78 научных работ, в том числе по теме диссертации 50, из них 13 в журналах, рекомендованных перечнем ВАК Минобрнауки России.

**Достоверность результатов** обеспечивается полевыми материалами, анализом большого массива статистических данных по структурной геологии, результатами термохронологических и изотопных аналитических исследований, публикациями и апробацией результатов на российских и международных конференциях.

**Структура диссертации и объем.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем 224 страниц машинописного текста, который иллюстрируется 122 рисунками, 9 таблицами. Список литературы включает 297 наименований.

**Благодарности.** Автор искренне благодарен научному руководителю к.г.-м.н. А.В. Прокопьеву и безвременно ушедшему к.г.-м.н. А.Г.Бахареву. Неоценимую помощь в работе оказали д.г.-м.н. А.К. Худoley, к.г.-м.н. Е.В. Ветров, к.г.-м.н. В.Б. Ершова, Г.Г. Казакова, к.г.-м.н. А.Ю. Егоров, к.г.-м.н. Д.А. Застрожных, коллеги из лаборатории геодинамики и региональной геологии ИГАБМ СО РАН, сотрудники аналитических подразделений. Автор признателен руководству АО «Прогноз», ФГУНПП «Аэрогеология» за помощь в проведении экспедиционных исследований; TGS-NOPEG Geophysical Company за поддержку в рамках проекта «Региональные геолого-геофизические исследования арктической континентальной окраины Сибири». И, конечно, работа не была бы написана без понимания и поддержки любимой семьи.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. Геологическое строение и состояние изученности тектонических структур северной части зоны форланда Верхоянского складчато-надвигового пояса**

В главе приведены общие сведения о ВСНП и прилегающих прогибах, а также краткое описание состояния изученности исследованной территории. Пояс является внешней, примыкающей к Сибирской платформе частью Верхояно-Колымской орогенной области. Он расположен вдоль восточной окраины Сибирской платформы и протягивается в субдолготном направлении на 2500 км при ширине до 500 км от побережья моря Лаптевых на севере и почти Охотского моря на юге. ВСНП сложен осадочными образованиями пассивной континентальной окраины общей мощностью более 15 км. По своей протяженности и ширине он сопоставим с аналогичным поясом Кордильер Северной Америки и имеет характерную М-образную форму в плане. В строении пояса выделяют приплатформенную зону форланда и расположенную восточнее зону хинтерланда и подразделяют (с юга на север) на Южно-Верхоянский, Западно-Верхоянский и Оленекский секторы. Причиной его возникновения считается коллизия Колымо-Омолонского супертеррейна с окраиной Сибирской платформы.

На западе со стороны платформы к поясу примыкает Приверхоянский краевой прогиб. В центральной части прогиб сливается с Виллойской синеклизой. Восточным ограничением ВСНП является Нерская зона разломов, отделяющая дистальные образования Верхоянской пассивной окраины от структур Полоусно-Дебинского террейна и образований расположенного восточнее Колымо-Омолонского супертеррейна [Тектоника, геодинамика..., 2001]. На севере расположен Лено-Анабарский прогиб, который протягивается вдоль границы Сибирской платформы и ВСНП почти на 2000 км при ширине до 400 км. Прогибы выполнены морскими и континентальными терригенными отложениями мезозоя мощностью до 7 и до 3 км, соответственно.

Исследования проводились: в центральной структуре Оленекского сектора – в Усть-Оленекской системе складок; в Западно-Верхоянском секторе – в Хараулахском (Быковский и Хараулахский антиклинории, Центрально-Хараулахский синклинорий) и Куранахском (зона сочленения Куранахского антиклинория и Сартангского синклинория) сегментах ВСНП, а также в прилегающих частях Приверхоянского и Лено-Анабарского прогибов (приложение 1, рис. 1).

### **Глава 2. Методы исследования**

Для решения поставленных задач использовались полевые и камеральные методы: фотодокументация, классические и современные



методы структурного и геометрического анализа, сбалансированных геологических разрезов, реконструкции полей тектонических напряжений, геохронологические исследования, обработка данных методами статистического анализа с использованием компьютерных программ.

Изучение плоскостных и линейных деформационных образований, малых структурных форм и наложенной складчатости с целью выявления разновозрастных структурно-метаморфических парагенезисов проводились на основе современных методик структурного и геометрического анализа [напр., Гзовский, 1975; Казаков, 1976; Родыгин, 1980, 2006; Ramsay, Huber, 1987; Кирмасов, 2011] с использованием компьютерных программ Stereonet, QuickPlot [Allmendinger et al., 2012; Cardozo, Allmendinger, 2013].

Для создания палинспастической модели структуры ВСНП были построены серии сбалансированных геологических разрезов в крест простираения структур на основе известных методик [напр., Dahlstrom, 1969, 1970; Williams, Chapman, 1983].

Реконструкция полей тектонических напряжений и расчет векторов главных нормальных напряжений по массовым замерам сместителей разломов и штриховок на зеркалах скольжения осуществлялась методами статистической обработки и на основе компьютерной программы FaultKinWin [Marrett, Allmendinger, 1990; Cardozo, Allmendinger, 2013; Allmendinger et al., 2012].

Для определения возраста тектонических деформаций использовался метод трекового датирования апатита (AFT), применяющийся для реконструкции термальной истории коренных пород, оценки времени вывода пород на поверхность (экзгумации), масштабов и скорости денудации [напр., Флейшер и др., 1981; Соловьев, 2008; Ветров, 2016 и др.]. Из более чем 50 образцов имеющейся коллекции были выделены монофракции апатитов (более 1000 зерен) и изготовлено 35 специализированных шашек для трекового датирования. Продатировано 28 образцов в двух независимых лабораториях: A2Z (Apatite to Zircon, Inc, США) и лаборатории минералогии и петрологии Гентского университета (Бельгия) методом внешнего детектора, описанным в [Donelick et al., 2005; De Grave, Van Den Haute, 2002; De Grave et al., 2009, 2011; Glorie et al., 2010; Green et al., 2014]. Для моделирования термальной истории было использовано программное обеспечение AFTSolve [Ketcham et al., 2000], HeFTy [Ketcham, 2005] и QTQt [Gallagher, 2012; Ketcham et al., 2007].

(U-Th)/He изотопные термохронологические датировки цирконов (ZHe) [напр., Reiners, Brandon, 2006; Crowhurst et al., 2002; Wolfe, Stockli, 2010; Farley et al., 1996; Farley, 2001, 2002, 2000] были получены в геохронологическом центре UTChron Департамента наук о Земле

Техасского университета в Остине, США. Цирконы были выделены из шести образцов и 36 кристаллов были использованы для датирования.

U-Pb (SHRIMP II) датирование цирконов из трех образцов магматических пород осуществлялось на ионном микрозонде SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург).

$^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  датирование минералов из двух образцов магматических пород было проведено в Центре коллективного пользования научным оборудованием много-элементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

### **Глава 3. Деформационные структуры северной части форланда Верхоянского складчато-надвигового пояса и прилегающих прогибов Сибирской платформы**

В главе рассмотрены результаты изучения складчатых и разрывных структур в пределах Оленекского, севера Хараулахского и центральной части Куранахского секторов форланда ВСНП, а также смежных прогибов – Лено-Анабарского и Приверхоянского (приложение 1, рис. 1). Детальными структурными исследованиями в каждом из изученных районов были выделены структурно-гомогенные домены, установлены структурные парагенезы, определена последовательность формирования тектонических структур и реконструированы поля тектонических напряжений.

Установлено, что в пределах изученной части Оленекского сектора ВСНП тектоническая структура была сформирована в процессе двух этапов деформаций [Васильев и др., 2011, 2012а, б]. Основная складчатость региона произошла в первый этап деформаций  $^{\circ}\text{D}_1$ . Все изученные складки этого этапа по морфологии и геометрии являются концентрическими, цилиндрическими и были сформированы при субдолготном и/или север-северо-восточном сжатии (приложение 1, рис. 2). Обнаруженные разломы сдвиговой кинематики находятся в едином структурном парагенезе с надвиговыми структурами. Проведенная интерпретация сейсмических профилей подтвердила возможность дуплексного строения этой части Оленекского сектора ВСНП [Васильев и др., 2012а]. Эти надвиговые структуры были образованы также в первый этап деформации  $^{\circ}\text{D}_1$ . Во второй этап деформаций  $^{\circ}\text{D}_2$  произошло образование структур растяжения – сбросов (приложение 1, рис. 3).

Деформационные структуры Хараулахского сегмента ВСНП были образованы в познемезозойское-раннекайнозойское время в четыре этапа деформаций – три ранних складчато-надвиговых  $^{\text{x}}\text{D}_1$ ,  $^{\text{x}}\text{D}_2$  и  $^{\text{x}}\text{D}_3$ , и поздний – растяжения  $^{\text{x}}\text{D}_4$ . Складчатость первых трех этапов деформации по геометрии и морфологии является концентрической, цилиндрической, реже конической (приложение 1, рис. 4 и 5). Кливаж проявлен дискретно:

наиболее интенсивный проникающий кливаж характерен для Центрально-Хараулахского синклинория и Быковского антиклинория, где развиты более мощные толщи карбона, перми и триаса [Васильев и др., 2013, 2014]. Во фронтальных структурах Хараулахского антиклинория кливаж непроникающий. Возраст деформаций первых двух этапов  $^X D_1$  и  $^X D_2$  – до кампан-сантонский, т.к. складки пермских отложений в Центрально-Хараулахском синклинории и Быковском антиклинории прорваны дайками долеритов этого возраста [Prokoriev et al., 2013a]. Время проявления третьего этапа сжатия  $^X D_3$  – пост-сантонское, но до палеоцен-эоценовое, т.к. наложенные раннекайнозойские грабены (Кенгдейский, Кунгинский и др.) выполнены отложениями этого возраста. Образование этих грабенов, а также сбросов связано с четвертым этапом деформаций растяжения  $^X D_4$ . Во фронте ВСНП (Чекуровская антиклиналь, Хараулахский антиклинорий) подтверждено присутствие предполагаемого ранее вдвигового клина (треугольной зоны), образовавшейся при формировании дуплекса с пассивной кровлей, в котором происходит локальная деформация и компенсация перемещений, связанных со смещением по Чекуровскому надвигу [Parfenov et al., 1995].

В центральной части Куранахского сегмента установлено, что морфология складчатых структур свидетельствует о проявлении складчатости концентрического, параллельного типа, образующейся путем изгибания слоев в результате межпластового проскальзывания [Васильев и др., 2010, Третьяков и др., 2008, Prokoriev et al., 2020]. Одинаковое северо-северо-западное простирание кливажа и складчатости однозначно свидетельствует об их тесной генетической связи и формировании в обстановке горизонтального сжатия субширотного направления. Установлено, что структурный парагенезис, представленный тектонической трещиноватостью, сбросами и разрывами межпластового отслоения, определяющий общее строение Мангазейского рудного узла и контролирующей размещение рудных тел, был образован в течение первого этапа деформаций  $^K D_1$  или в процессе пластовых срывов и складчато-надвиговых дислокаций, а не в сдвиговом поле напряжений второго этапа деформаций. Происхождение этого структурного парагенезиса тесно связано с формированием крупной Эндыбальской антиклинали концентрического типа и приурочено к ее восточной части, которая определяется как зона или полоса наибольшего перегиба антиклинали. Сдвиговые движения второго этапа деформаций  $^K D_2$  не только создавали новообразованные структуры, но и во многом унаследовали разрывные нарушения и структурный план предыдущего этапа. Формирование сбросовых разрывных нарушений данной территории происходило одновременно со складчато-надвиговыми структурами и не связано с каким-либо самостоятельным

позднемезозойским этапом растяжения или участками локального растяжения присдвиговых деформаций. Соответствие направлений крупных разломов и установленных сдвиговых разрывов позволяет утверждать, что кинематика крупных разломов в значительной мере сдвиговая. Проявление разных типов тектонических деформаций контролируется литологическим составом пород. Складчатые структуры были прорваны гранитоидным плутоном и дайками с изотопным возрастом от 98 до 105 млн лет (приложение 1, рис. 6) [Прокопьев и др., 2010, 2018]. Таким образом, возраст деформаций до ранне-сеноманский. Под Куранахским антиклинорием предполагается крупный дуплекс, кровельный надвиг которого приурочен к границе существенно карбонатных отложений нижнего-среднего палеозоя и терригенных пород верхнего палеозоя. Детachment (подошвенный надвиг дуплекса) смещается в основание осадочного комплекса и трассируется по кровле кристаллического фундамента [Парфенов, Прокопьев, 1993; Parfenov et al., 1995; Прокопьев, 1998]. Мы предполагаем, что ядерная часть Эндыбальской антиклинали расположена над этим дуплексом и образовалась одновременно с ним [Третьяков и др., 2008; Prokoriev et al., 2020].

Предлагается модель формирования крупных концентрических Эндыбальской, Чекуровской, и Усть-Оленекской антиклиналей, которая может рассматриваться как усовершенствованная модель В. Ярошевского (1981). Складчато-надвиговый этап деформаций подразделяется на несколько стадий [Prokoriev et al., 2013b; Vasiliev et al., 2018, 2019]. Предложенная модель формирования складчато-надвиговых структур позволяет утверждать, что формирование надвигов имело тыловую последовательность и происходило с запада на восток. Построение сбалансированных разрезов показало, что минимальное сокращение деформированных пород в Эндыбальской антиклинали могло составить 20% (от 19,7 км до 15,8 км). Для Хараулахского сегмента ВСНП рассчитано, что сокращение стратиграфической последовательности за счет складчатости и надвигообразования ~30%. Для Усть-Оленекской системы складок можно предположить сокращение в результате деформаций в пределах 20–30%.

#### **Глава 4. Термотектонические события севера фронтальной части Верхоянского складчато-надвигового пояса и прилегающих прогибов Сибирской платформы по данным низкотемпературной геохронологии**

В Оленекском секторе ВСНП (Усть-Оленекская и Приморская антиклинали), Лено-Анабарском прогибе (Таймыльйрская синклиналь) и Оленекском поднятии из 14 образцов песчаников раннепермского –

раннемелового возраста были выделены и исследованы апатиты [Васильев и др., 2018]. Полученные трековые возрасты моложе времени осадконакопления изученных пород и образуют четыре представительные группы: раннеюрскую ( $199.0 \pm 7.0$  млн лет), среднеюрскую ( $173.0 \pm 6.0$  млн лет), позднеюрско-раннемеловую ( $148.0 \pm 5.0$  млн лет –  $140.67 \pm 13.94$  млн лет) и позднемеловую ( $93.75 \pm 10.08$  –  $74.8 \pm 3.2$  млн лет) (приложение 2, рис. 7 и 8). Также наблюдается постепенное омоложение вкрест простирания Усть-Оленекской системы складок трековых возрастов с юга на север от  $86.0 \pm 3.6$  до  $74.8 \pm 3.2$  млн лет. Интерпретация графиков термальной эволюции показала, что самую большую скорость денудации (остывание на  $15^\circ\text{C}/\text{млн лет}$ ) во временном интервале 65–60 млн лет показывает образец из Приморской антиклинали (приложение 2, рис. 9). Следующие по величине скорости денудации (остывание на  $5\text{--}9^\circ\text{C}/\text{млн лет}$  во временном интервале 195–185 млн лет назад) демонстрируют два образца из центральной части Усть-Оленекской антиклинали. На графиках термальной эволюции двух других образцов также выделяются менее очевидные возрастные интервалы 45–30 и 30–20 млн лет. Таким образом, на исследованной территории можно предположить проявление следующих термотектонических событий: 199–185 млн лет (ранняя юра), 148–141 млн лет (конец юры – ранний мел), 94–75 млн лет (поздний мел), 45–20 млн лет (эоцен – ранний миоцен) (приложение 2, рис. 10А).

На севере Хараулахского сегмента (Центрально-Хараулахский синклиниорий, Юттыхская и Чекуровская антиклинали, Тасаринская синклиналь) и Приверхоянского прогиба, а также эоценовых толщ Кенгдейского грабена трековое датирование апатитов было проведено из 12 образцов пермских – эоценовых песчаников [Васильев и др., 2019]. Полученные трековые возрасты моложе времени осадконакопления изученных пород и подразделяются на три группы: кампан-палеоценовую ( $76.6 \pm 3.1$  –  $57.4 \pm 3.6$  млн лет), сеноман-туронскую ( $95.4 \pm 5.8$  –  $90.0 \pm 4.3$  млн лет) и ааленскую ( $171.0 \pm 6.0$  млн лет) (приложение 2, рис. 7 и 8). Для образцов, отобранных вкрест простирания северной части Приверхоянского прогиба, наблюдается постепенное омоложение трековых возрастов от  $171.0 \pm 6.0$  млн лет на западе, на границе Оленекского поднятия и Приверхоянского краевого прогиба, до  $59.8 \pm 2.7$  млн на востоке, на западном крыле Чекуровской антиклинали. Из интерпретации графиков термальной эволюции следует, что наибольшую скорость денудации (остывание на  $10^\circ\text{C}/\text{млн лет}$ ) показывает наиболее представительный образец из Центрально-Хараулахского синклинория, во временном интервале 60–50 млн лет (приложение 2, рис. 9). Следующие по величине скорости денудации (остывание на  $5\text{--}8^\circ\text{C}/\text{млн лет}$ ) показывают три образца примерно в этом же временном интервале 70–50 млн лет.

В тыловой части зоны форланда ВСНП в Центрально-Хараулахском синклинии и Быковском антиклинории из шести образцов каменноугольных, пермских и триасовых песчаников были выделены цирконы и проведено (U-Th)/He изотопное датирование. Полученные ZHe возрасты образуют две группы. Первая, наиболее молодая, показывает временной интервал в 140–93 млн лет. Вторая группа показывает разброс ZHe возрастов от 351 до 234 млн лет. Последние датировки древнее стратиграфического возраста опробованных пород и отражают время эксгумации источников сноса кластики.

Таким образом, на севере Хараулахского сегмента можно предположить проявление следующих термотектонических событий: ~351 млн лет (ранний карбон) и ~234 млн лет (средний триас) (ZHe датировки), 140–93 млн лет (ранний мел), 95–57 млн лет назад (кампан–палеоцен). Менее вероятны следующие события: 110–55 млн лет (погружение), 50–25 млн лет (погружение), 45–40 млн лет (поднятие) (AFT) (приложение 2, рис. 10Б).

Для трекового датирования апатитов из отложений Куранахского сегмента были отобраны образцы песчаников с восточного крыла Эндыбальской антиклинали, два из которых (из толщ нижней перми и нижнего триаса) были проанализированы. Анализ распределения длин треков, степени перезагруженности трековых систем и трековых возрастов позволяет предполагать, что полученные возрасты 59–62 млн лет могут быть омоложенными. Наиболее вероятно, что вторичный отжиг связан с проявлением в раннем мелу интенсивной магматической деятельности, образованием Эндыбальского плутона и связанных с ним даек. С другой стороны, полученные трековые возрасты близки к времени пенепленизации изученной территории, охватившей изучаемый регион в начале кайнозоя.

Методы низкотемпературной геохронологии позволяют приблизительно оценить величину денудации. В результате изучения глубины погружения и соответственно мощности эродированных толщ установлено, что при удалении от платформы в сторону складчатых областей увеличивается величина денудации (приложение 2, рис. 11). Если в Лено-Анабарском и Приверхожанском прогибах денудация колеблется от 2 до 3,3 км, то в прилегающих частях Усть-Оленекской системы складок и Хараулахского сегмента, достигает, как правило, значений от 3 км и больше. В тыловой части Усть-Оленекской системы складок, в Приморской антиклинали, денудация уже больше 4 км, как и в центральной части Хараулахского сегмента (Центрально-Хараулахский синклиний). Далее на восток, в осевой части Центрально-Хараулахского синклиния, денудация составляет менее 6 км. Еще восточнее, в Быковском антиклинории, она уже явно больше 6 км. Нами установлено, что увеличение происходит не

только на восток, но и на север. Полученные нами для Приверхоанского прогиба глубины погружения пород примерно совпадают с предложенными Г.С. Гусевым (1979). Однако далее на восток Г.С. Гусевым предполагались большие мощности эродированных пород вплоть до 8 км.

Мощность эродированного материала в восточной и северной частях Оленекского поднятия могла составлять от 2 до 3,3 км. Полученные трековые датировки в 199–171 млн лет несколько моложе выделяемой Ф.Ф. Брахфогелем (1984) на изучаемой территории третьей эпохи денудации (230–180 млн лет), связываемой с воздыманием практически всей северо-восточной части Сибирской платформы. Небольшие расхождения в возрасте, возможно, связаны с тем, что воздымания этого периода, по Ф.Ф. Брахфогелю, носили отчетливо дифференцированный характер, в силу чего разные части региона оказывались в сфере денудации неодновременно.

Образцы Куранахского сегмента по данным трекового датирования погружались на глубину от 2 до 4 км. При этом мощности денудации, полученные в результате анализа графиков термальной эволюции, составляют от 2,3 до 2,5 км. Следует также отметить фиксируемое на графике термальной эволюции одного образца погружение (нагрев) на 0,8–1 км в палеогене. Согласно стратиграфическим колонкам, мощности залегающих выше толщ от 1 до 2,4 км. С учетом этого можно предположить, что были эродированы отложения мощностью от 0 до 1,5 км, что хорошо согласуется с данными трекового датирования апатитов.

## **Глава 5. Структурная эволюция фронтальной части севера ВСНП и прилегающих Приверхоанского и Лено-Анабарского прогибов Сибирской платформы**

Проведена корреляция и установлены следующие структурно-тектонические и термальные события, приведшие к формированию современного структурного плана региона (приложение 3, рис. 12 и 13):

Среднедевонско-среднекаменноугольный континентальный рифтогенез (380–346 млн. лет), приведший к формированию Вилуойского палеорифта и базитов Якутско-Вилуойской крупной изверженной провинции [напр., Polyansky et al., 2017 и ссылки там; Прокопьев и др., 2016; Prokoriev et al., 2018b]. Рифтогенные структуры этого возраста предполагаются в «фундаменте» мезозойского ВСНП под изученными структурами Хараулахского и Куранахского секторов [Третьяков, 2004; Прокопьев и др., 2015; Polyansky et al., 2017; Ershova et al., 2020]. Предполагается, что эти процессы сопровождалось образованием контрастного рельефа, включая появление крутого подводного склона [напр., Ершова и др., 2011; Прокопьев и др., 2013]. Полученные нами раннекаменноугольные ЗНе

датировки могут быть связаны с подъемом территории на заключительном этапе среднепалеозойского рифтогенеза [напр., Polyansky et al., 2017 и ссылки там].

Среднетриасовые ZHe даты могут отражать этап тектонического поднятия на северо-востоке Сибирской платформы, приведшего к размытию прилегающих частей Сибирской платформы и образованию триасовых алмазосодержащих конгломератов Булкурской антиклинали фронта Хараулахского сегмента [Зайцев, Смелов, 2010; Летникова и др., 2014].

### ***1. Раннеюрское поднятие.***

Данное событие фиксируется трековыми возрастными в 199–171 млн лет, установленными на северном склоне Оленекского поднятия и в Усть-Оленекской системе складок, а также на севере Хараулахского сегмента. Причина этого события неизвестна, но оно коррелирует с одновозрастным термальным событием, произошедшим в центральной части Таймыро-Североземельского орогенного пояса [Khudoley et al., 2018], связанным с тектоническим подъемом и обширной морской трансгрессией на северо-востоке Сибирской платформы [Князев и др., 1991].

### ***2. Позднеюрско-раннемеловые складчато-надвиговые деформации.***

Термохронологические события этого возраста установлены в Оленекском секторе и Хараулахском сегменте. Эти эпизоды тектонического поднятия и остывания мы связываем с первыми импульсами складчато-надвиговых деформаций фронта ВСНП. В Усть-Оленекской системе складок произошли деформации ранней стадии первого этапа  ${}^0D_1^1$  (AFT – ~148–141 млн лет), а в Хараулахском сегменте имел место первый этап деформаций  ${}^XD_1$  (ZHe – 140–117 млн лет). Складчатость  ${}^KD_1$  и  ${}^KD_2$  в центральной части Куранахского сегмента могла произойти в это же время. Причиной этих деформаций могли быть два субсинхронных геодинамических события – начало коллизии восточной окраины Сибирского кратона и Колымо-Омолонского супертеррейна на востоке, и акреционно-коллизивные события, связанные с закрытием Южно-Ануйского океана и началом коллизии микроконтинента Арктическая Аляска–Чукотка с Сибирью на севере [Prokoriev et al., 2018a].

### ***3. Позднемеловые деформации.***

ZHe возраст ~ 93 млн лет, установленный в Быковской антиклинории и Центрально-Хараулахской синклинории, может отражать начало второго этапа складчато-надвиговых деформаций  ${}^XD_2$  на рубеже раннего и позднего мела, а полученная дата близка к трековому возрасту апатита (95–90 млн лет).

В тылу северной части фронта Хараулахского сегмента около 89–86 млн лет назад произошло локальное вулканическое событие – эксплозивные брекчии и дайки долеритов этого возраста, прорывающие деформированные пермские породы ( ${}^XD_2$ ) Центрально-Хараулахского



синклиория и Быковского антиклиория, имеют возраст  $86 \pm 4$ ,  $86.2 \pm 1.3$  и  $89 \pm 2$  млн. лет (U-Pb, цирконы) [Prokoriev et al., 2013a].

В интервале  $\sim 86$ – $75$  млн лет (AFT) произошло термальное событие в Усть-Оленекской системе складок, с которым могут быть связаны предполагаемые складчато-надвиговые деформации второй стадии  ${}^0D_1^2$  и которому предшествовал тектонический подъем ( $\sim 93$ – $86$  млн лет назад, AFT) в Лено-Анабарском прогибе. Близко по времени произошел подъем восточнее, в северной части Приверхоянского прогиба ( $\sim 90$ – $77$  млн лет, AFT).

Несколько позднее ( $\sim 75$ – $61$  млн лет назад, AFT) произошли заключительные складчато-надвиговые деформационные события  ${}^XD_3$  во фронте Хараулахского сегмента, что подтверждается наложением кливажа на дайки долеритов, имеющих возраст  $86$ – $89$  млн лет. В эоценовых отложениях Кенгдейского грабена значительно преобладают зерна апатита, имеющие трековые возрасты около  $73.6 \pm 3.5$  млн лет, близкие к этому термохронологическому событию. Следовательно, при накоплении этих толщ происходил размыв поднимающегося горно-складчатого сооружения.

Позднемеловые деформации коррелируют с установленным нами по данным (U-Th)/He изотопного датирования циркона и апатита временем третьего–пятого деформационных этапов на островах Новосибирского архипелага, связанных с коллизией микроконтинента Арктическая Аляска–Чукотка с Сибирью и образованием Новосибирско-Чукотского орогенного пояса (ZHe возраста  $150$ – $93$  млн лет) [Prokoriev et al., 2018a]. Вероятно, установленные нами позднемеловые деформационные структуры в Усть-Оленекской системе складок и на севере Хараулахского сегмента, связаны именно с этим геодинамическим событием.

#### ***4. Кайнозойские деформации.***

В начале палеогена в связи с продолжением продвижения спредингового хребта Гаккеля в южном направлении были образованы кайнозойские грабены, крупнейшим из которых является Кенгдейский, в котором накопилось около  $600$  м осадков. С этим событием, вероятно, связаны установленные нами по данным интерпретации графиков термальной эволюции события  $\sim 45$ – $20$  млн лет назад. Примерно с этого времени началось растяжение на шельфе моря Лаптевых приведшее к формированию крупных кайнозойских грабенов Лаптевской рифтовой системы [напр., Drachev, 2011, 2016].

Отмечаемая современная высокая сейсмическая активность в Оленекском секторе вероятно связана с перемещениями вдоль границы Евразийской и Северо-Американской литосферных плит [напр. Имаев и др., 1990; Тектоника, геодинамика...2001; Имаева, 2022].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных исследований расширены представления об истории геологического развития северной части ВСНП, территории, перспективной на обнаружение стратегически важных твердых полезных ископаемых и углеводородов. Впервые для этой территории расшифрована кинематика складчатых и разрывных деформаций; выделены основные структурные парагенезы; установлен возраст и уточнена последовательность формирования деформационных структур фронта Оленекского сектора, Хараулахского и Куранахского сегментов ВСНП. Определены направления главных осей палеонапряжений, при воздействии которых были сформированы мезозойско-кайнозойские деформационные структуры. Предложена модель формирования исследованных концентрических антиклинальных структур и связанных с ними разрывных нарушений. Установлены основные черты сходства в строении, морфологии, взаимоотношении складчатых и разрывных деформаций в изученных крупных антиклиналях. Предложены модели глубинного строения изученных регионов. Подтверждено дуплексное строение Оленекского сектора ВСНП.

2. Впервые для изучаемой территории проведено трековое датирование апатитов (AFT), по данным которого, а также (U-Th)/He анализа изотопной геохронологии впервые установлены основные временные интервалы тектонических поднятий различных частей ВСНП, связанные с выделенными этапами деформаций: раннеюрский (~190–171 млн лет), позднеюрско-раннемеловой (~148–117 млн лет –  ${}^0D_1^1$ ,  ${}^X D_1$ ,  ${}^K D_1$  и  ${}^K D_2$ ) и позднемеловой (~95–90 млн лет –  ${}^X D_2$ , ~86–75 млн лет –  ${}^0 D_1^2$ , ~75–61 млн лет –  ${}^X D_3$ ). Мощность эродированных пород увеличивается от Сибирской платформы в восточном и северном направлении в сторону складчатых областей от 2 км до более чем 6 км. С наибольшей скоростью породы денудировали в центральной части Усть-Оленекской системы складок, а также на севере Хараулахского сегмента.

3. Определена структурная позиция рудных тел с Ag-полиметаллической минерализацией Мангазейского рудного узла в ядре Эндыбальской антиклинали центральной части Куранахского сегмента ВСНП (месторождения Нижне-, Верхнеэндыбальское, Безымьянное, Стержневое и Семеновское). По данным U-Pb и  ${}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}$  датирования прорывающих складчатость магматических образований установлен до сеноманский возраст деформаций.

4. Впервые по данным структурного анализа, изотопной геохронологии и низкотемпературной термохронологии проведена корреляция мезозойских и кайнозойских деформационных событий на севере и в центральной части ВСНП со смежными регионами Новосибирско-Чукотского и Таймыро-Североземельского орогенных поясов, и

рифтогенными структурами, связанными с раскрытием Евразийского океанического бассейна.

5. Данные по структурному строению и тектонической эволюции северо-востока Сибирской платформы и северного фланга ВСНП будут способствовать созданию геологической основы для адекватной интерпретации строения акустического фундамента и осадочного чехла мезо–кайнозойских бассейнов седиментации шельфа моря Лаптевых; могут быть использованы при создании геологических и тектонических карт нового поколения. Результаты исследований имеют стратегическое значение для экономической и сырьевой безопасности, освоения арктической зоны Российской Федерации.

### **Основные публикации по теме диссертации**

*В журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:*

1. Васильев, Д.А., Прокопьев, А.В., Ивенсен, Г.В. Литохимия верхнекаменноугольных – нижнепермских и триасовых отложений восточного крыла Куранахского антиклинория (Западное Верхоянье) // Отечественная геология, 2010. – № 5. – С. 75–83.

2. Васильев, Д.А., Ивенсен, Г.В., Прокопьев, А.В. Литохимия верхнепалеозойско-мезозойских отложений Усть-Оленекской системы складок // Отечественная геология, 2011. – № 5. – С. 89–96.

3. Васильев, Д.А., Прокопьев, А.В. Глубинное строение Оленекского сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса по данным интерпретации сейсморазведочных временных профилей // Отечественная геология, 2012а. – № 5. – С. 62–66.

4. Васильев, Д.А., Прокопьев, А.В. Структура и тектонофизика Усть-Оленекской системы складок (Арктическая Якутия) // Наука и образование, 2012б. – №3 (67). – С. 7–13.

5. Васильев, Д.А., Ивенсен, Г.В., Ершова, В.Б., Прокопьев, А.В. Особенности химического состава нижнемеловых отложений северной части Приверхоянского краевого прогиба // Отечественная геология, 2013а. – № 5. – С. 106–115.

6. Васильев, Д.А., Ивенсен, Г.В., Ершова, В.Б. Литохимия среднеюрско-нижнемеловых терригенных пород северной части Приверхоянского прогиба // Отечественная геология, 2014а. – № 5. – С. 24–32.

7. Васильев, Д.А., Прокопьев, А.В., Худoley, А.К., Ершова, В.Б., Казакова, Г.Г., Ветров, Е.В. Термохронология северной части Верхоянского складчато-надвигового пояса по данным трекового датирования апатита // Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2019. – Т. 24. – № 4. – С. 49–66.

8. Прокопьев, А.В., Худoley, А.К., Королева, О.В., Казакова, Г.Г., Лохов, Д.К., Малышев, С.В., Зайцев, А.И., Роев, С.П., Сергеев, С.А., Бережная, Н.Г., Васильев, Д.А. Раннекембрийский бимодальный магматизм на северо-востоке Сибирского кратона // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 1. – С. 199–224.

9. Прокопьев, А.В., Борисенко, А.С., Гамянин, Г.Н., Фридовский, В.Ю., Кондратьева, Л.А., Анисимова, Г.С., Трунилина, В.А., Васюкова, Е.А., Иванов, А.И., Травин, А.В., Королева, О.В., Васильев, Д.А., Пономарчук, А.В. Возрастные рубежи и геодинамические обстановки формирования месторождений и магматических образований Верхояно-Колымской складчатой области // Геология и геофизика, 2018. – Т. 59. – № 10. – С. 1542–1563.

10. Третьяков, Ф.Ф., Прокопьев, А.В., Васильев, Д.А. Тектонические структуры Мангазейского рудного узла (Западное Верхоянье, Восточная Якутия) // Отечественная геология, 2008. – № 5. – С. 42–49.

11. Polyansky, O.P., Prokopiev, A.V., Koroleva, O.V., Tomshin, M.D., Reverdatto, V.V., Selyatitsky, A.Yu., Travin, A.V., Vasiliev, D.A. Time correlation between the formation of dike swarms and crustal extension stages in the Middle Paleozoic Vilyui rift basin (Siberian platform) // Lithos. – 2017. – V. 282–283. – P. 45–64.

12. Prokopiev, A.V., Ershova, V.B., Anfinson, O., Stockli, D., Powell, J., Khudoley, A.K., Vasiliev, D.A., Sobolev, N.N., Petrov, E.O. Tectonics of the New Siberian Islands Archipelago: Structural Styles and Low-Temperature Thermochronology // Journal of Geodynamics. – 2018a. – V. 121. – P. 155–184.

13. Prokopiev, A.V., Ershova, V.B., Khudoley, A.K., Vasiliev, D.A., Baranov, V.V., Kalinin, M.A. Pre-mid-Frasnian angular unconformity on Kotel'ny Island (New Siberian Islands Archipelago): evidence of Mid-Paleozoic Deformation in the Russian High Arctic // Arktos. – 2018b. 4: 25.

*В изданиях, индексируемых в библиографических базах WoS/SCOPUS:*

1. Prokopiev, A.V., Tretyakov, F.F., Vasiliev, D.A. Tectonic structures of the Mangazeya ore cluster (Verkhoyansk Range, NE Asia) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2020. – V. 609 – P. 012065.

2. Vasiliev, D.A., Prokopiev, A.V., Tretyakov, F.F. Comparative analysis of tectonic structures of the North-Eastern and Eastern framing of the Siberian platform (North-East Asia) // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2018). Conference proceedings. 2018. Vol. 18. Iss.1.1. – P. 43–50.

3. Vasiliev, D.A., Prokopiev, A.V. Paleostress axes in the North-eastern and Eastern folded framing of the Siberian platform // 19th International

Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2019). Conference proceedings. 2019. Vol. 19. Iss.1.1. – P. 421–428

*Наиболее значимые тезисы докладов в материалах конференций, индексируемых в библиографических базах РИНЦ:*

1. Васильев, Д.А., Прокопьев, А.В., Худoley, А.К., Казакова, Г.Г., Ветров, Е.В. Термохронология Усть-Оленекской системы складок и севера Оленекского поднятия по данным трекового датирования апатита // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. – Якутск: Издательство Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2018. – Т. 2. – С. 32–36.

2. Прокопьев, А.В., Павлова, Г.Г., Борисенко, А.С., Травин, А.В., Торо, Х., Третьяков, Ф.Ф., Зайцев, А.И., Бахарев, А.Г., Трунилина, В.А., Васильев, Д.А., Роев, С.П. Дайки и плутоны поперечных магматических поясов Верхоянского складчато-надвигового пояса: новые геохронологические данные и их геодинамическая интерпретация // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя. – Москва: ГЕОС, 2010. – С. 174 – 177.

3. Prokopiev, A.V., Khudoley, A.K., Egorov, A.Yu., Gertseva, M.V., Afanasieva, E.V., Sergeenko, A.I., Ershova, V.B., Vasiliev, D.A. Late Cretaceous – Early Cenozoic Indicators of Continental Extension on the Laptev Sea Shore (North Verkhoyansk) // The Polar Petroleum Potential (3P Arctic), 15-18 october 2013. Conference & Exhibition Abstracts. – Stavanger, Norway, 2013a. – Paper 170.

4. Prokopiev, A.V., Khudoley, A.K., Ershova, V.B., Vasiliev, D.A. Structure and Late Mesozoic – Early Cenozoic Evolution of the Verkhoyansk and Olenek fold belts (Laptev Sea shore) Junction Z // The Polar Petroleum Potential (3P Arctic), 15-18 october 2013. Conference & Exhibition Abstracts. – Stavanger, Norway, 2013b. – Paper 48.

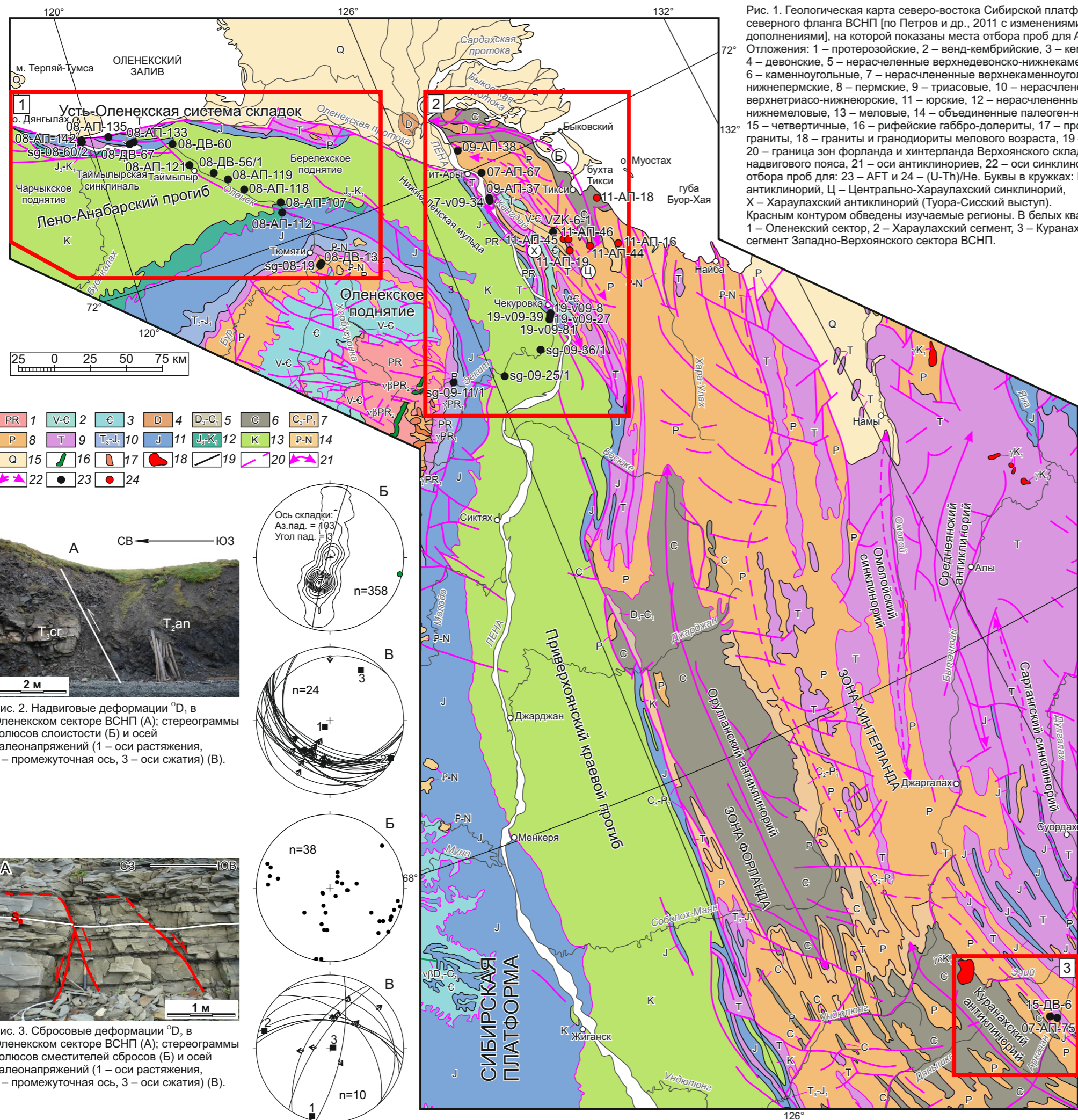


Рис. 1. Геологическая карта северо-востока Сибирской платформы и северного фланга ВСНП [по Петров и др., 2011 с изменениями и дополнениями], на которой показаны места отбора проб для АФТ и (U-Th)/He: Отложения: 1 – протерозойские, 2 – венд-кембрийские, 3 – кембрийские, 4 – девонские, 5 – нерасчлененные верхнедевонско-нижнекаменноугольные, 6 – каменноугольные, 7 – нерасчлененные верхнекаменноугольно-нижнепермские, 8 – пермские, 9 – триасовые, 10 – нерасчлененные верхнетриасо-нижнеюрские, 11 – юрские, 12 – нерасчлененные верхнеюрско-нижнемеловые, 13 – меловые, 14 – объединенные палеоген-неогеновые, 15 – четвертичные, 16 – рифейские габбро-долериты, 17 – протерозойские граниты, 18 – граниты и гранодиориты мелового возраста, 19 – разломы, 20 – граница зон форланда и хинтерланда Верхоянского складчатонадвигового пояса, 21 – оси антиклинориев, 22 – оси синклинориев, места отбора проб для: 23 – АФТ и 24 – (U-Th)/He. Буквы в кружках: Б – Быковский антиклинорий, Ц – Центрально-Хараулахский синклинорий, Х – Хараулахский антиклинорий (Туора-Сисский выступ). Красным контуром обведены изучаемые регионы. В белых квадратах: 1 – Оленекский сектор, 2 – Хараулахский сегмент, 3 – Куранахский сегмент Западно-Верхоянского сектора ВСНП.

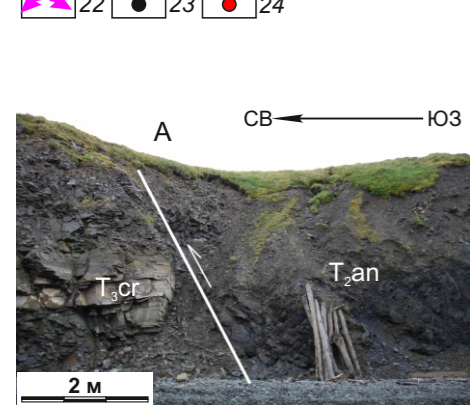


Рис. 2. Надвиговые деформации  $D_1$  в Оленекском секторе ВСНП (А); стереограммы полюсов слоистости (Б) и осей палеонапряжений (1 – оси растяжения, 2 – промежуточная ось, 3 – оси сжатия) (В).

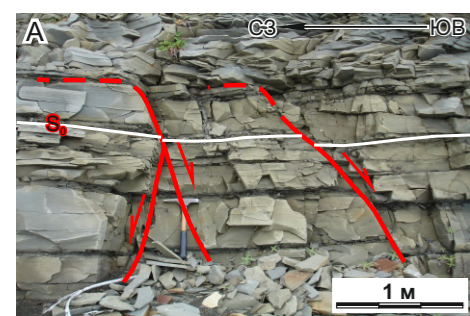
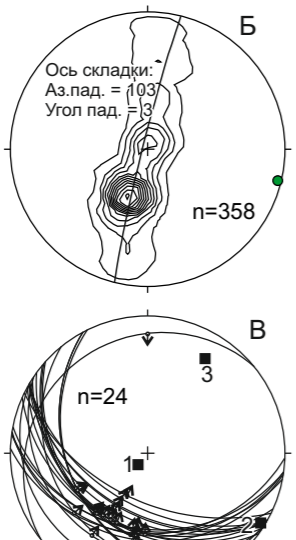


Рис. 3. Сбросовые деформации  $D_2$  в Оленекском секторе ВСНП (А); стереограммы полюсов сместителей сбросов (Б) и осей палеонапряжений (1 – оси растяжения, 2 – промежуточная ось, 3 – оси сжатия) (В).

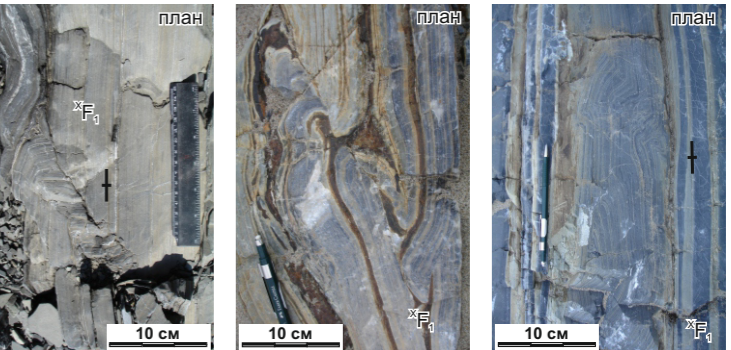
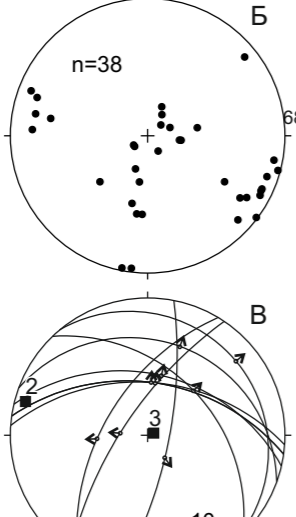


Рис. 4. Взаимоотношения ранних ( $D_1$ ) и поздних ( $D_2$ ) деформаций на западном крыле Чекурвской антиклинали (левый борт р. Лены). Местоположение фотографий Б показано на рисунке А красным прямоугольником. Хараулахский сегмент Западно-Верхоянского сектора ВСНП

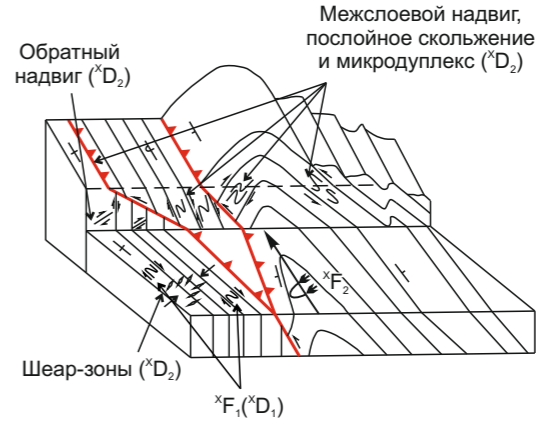


Рис. 5. Модель взаимоотношения деформаций первых двух этапов на крыльях и в ядре Чекурвской антиклинали

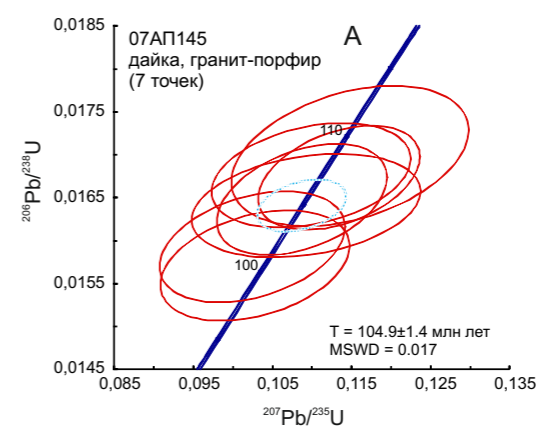
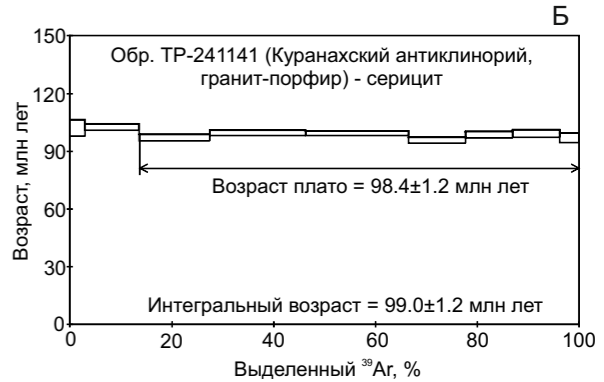


Рис. 6. Результаты изотопного датирования магматических пород Куранахского синклинория: А - U-Pb (цирканы), Б -  $^{40}Ar/^{39}Ar$  (серцит) методами [Прокопьев и др., 2018].



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

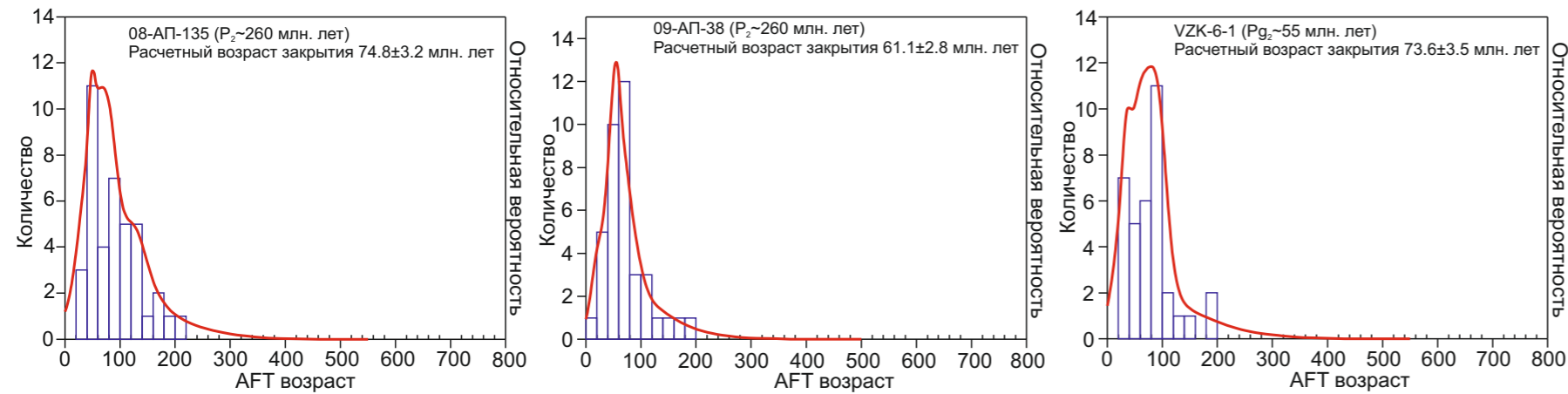


Рис. 7. Трековый возраст наиболее представительных образцов Оленекского сектора (08-АП-135), Хараулахского сегмента (09-АП-38, VZK-6-1) Западно-Верхоянского сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса

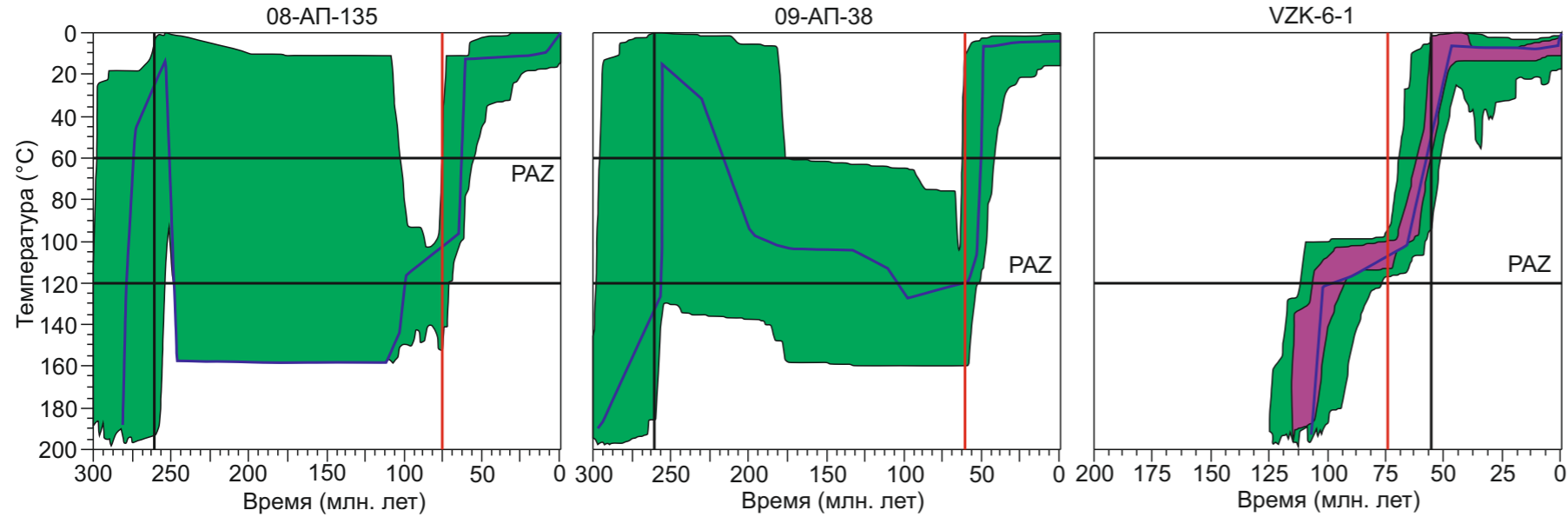


Рис. 9. График термальной эволюции на модели программы HeFTy [Ketchum, 2005] для образцов Оленекского сектора (08-АП-135) и Хараулахского сегмента (09-АП-38, VZK-6-1). Черная прямая вертикальная линия – стратиграфический возраст образца, красная прямая вертикальная линия – трековый возраст. PAZ – зона частичного отжига треков.

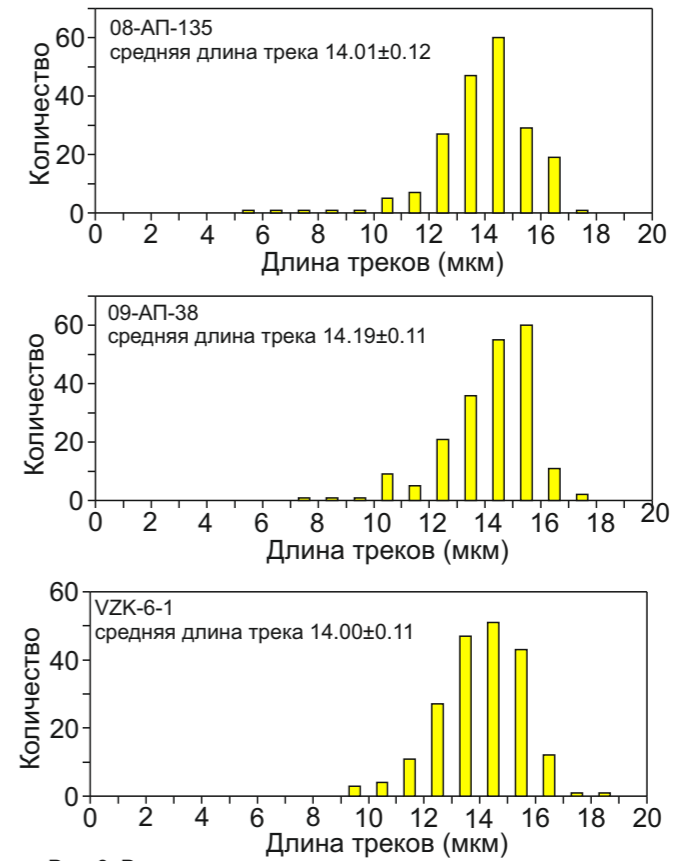


Рис. 8. Распределение и значения средних длин треков в апатитах из изученных образцов Оленекского сектора (08-АП-135) и Хараулахского сегмента (09-АП-38, VZK-6-1) Западно-Верхоянского сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса.

Рис. 11. Геологическая карта северо-востока Сибирской платформы и северного фланга ВСНП [по Петров и др., 2011 с изменениями и дополнениями], на которой показаны изолинии мощностей денудированных пород: 1–15 – отложения: 1 – архейские, 2 – протерозойские, 3 – венд-кембрийские, 4 – кембрийские, 5 – девонские, 6 – каменноугольные, 7 – пермские, 8 – триасовые, 9 – верхнетриас-нижнеюрские, 10 – юрские, 11 – верхнеюрско-нижнемеловые, 12 – меловые, 13 – палеогеновые, 14 – неогеновые, 15 – четвертичные; 16 – штоки основного состава, 17 – разломы, 18 – места отбора проб и их номера, 19 – изолинии мощностей денудированных пород.

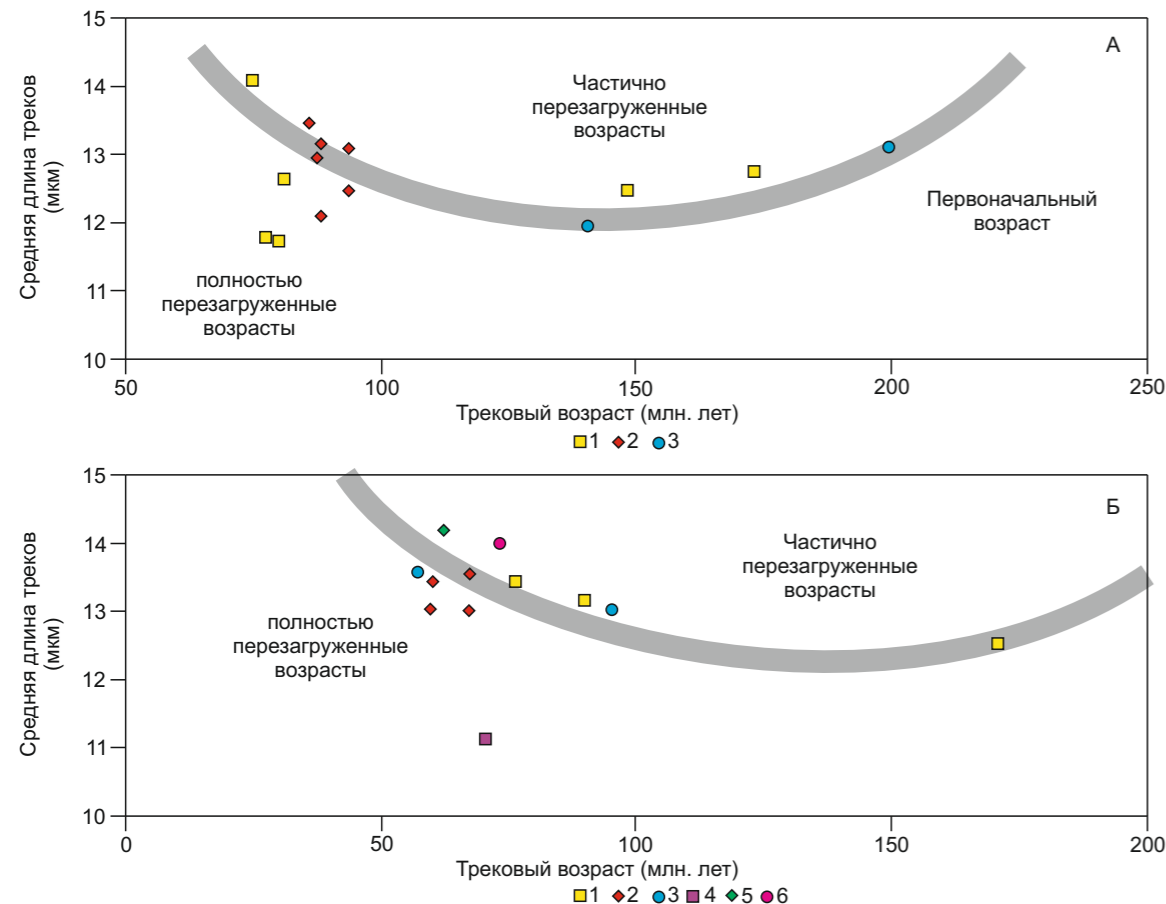
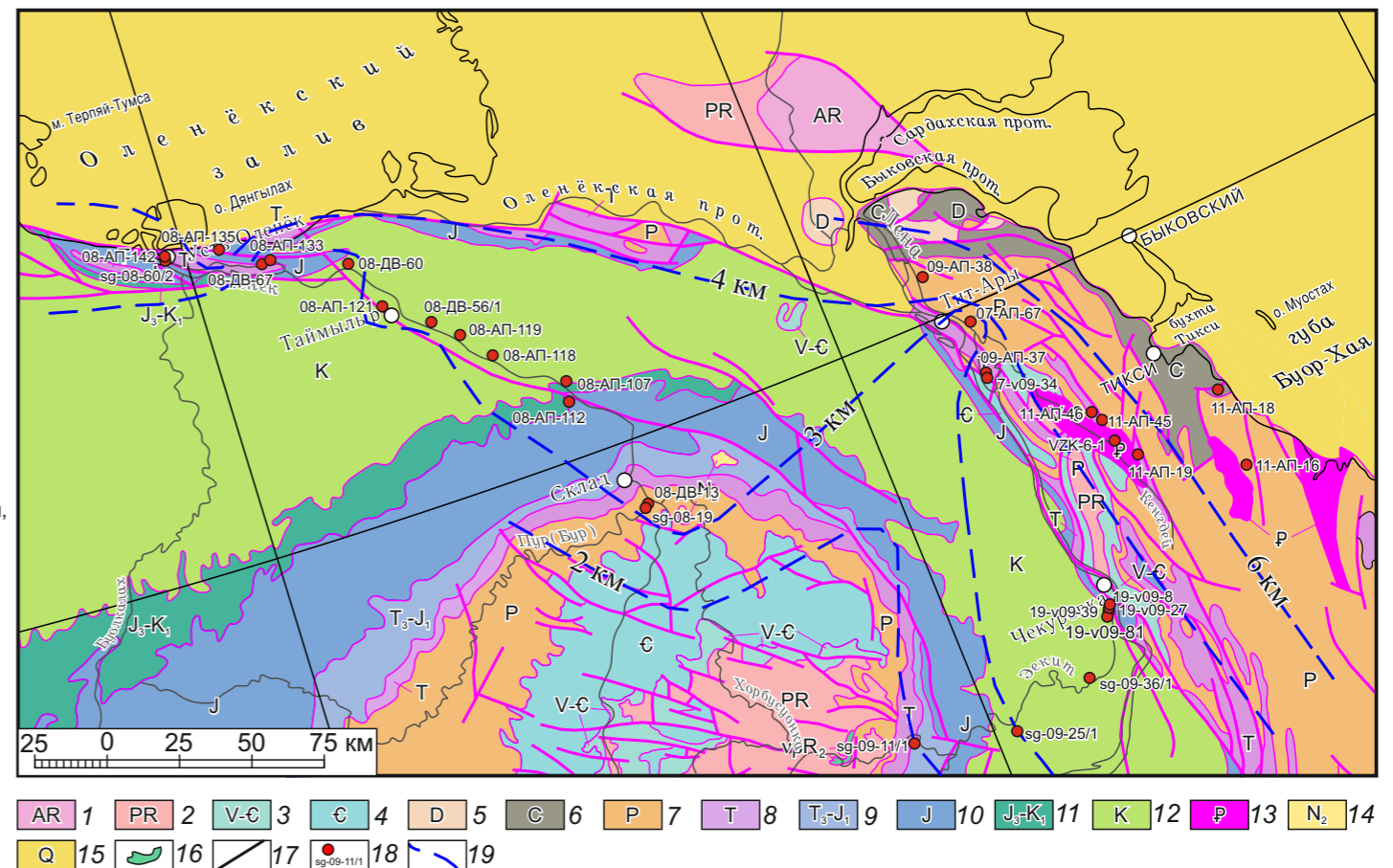


Рис. 10. «График-бумеранг» (А) [Green, Duddy, 2014], для образцов Оленекского сектора ВСНП (А) и Хараулахского сегмента (Б) Западно-Верхоянского сектора ВСНП. Серая линия – линия «бумеранга». А - образцы из: 1 – Усть-Оленекской системы складок, 2 – Лено-Анабарского прогиба, 3 – Оленекского поднятия, Б - образцы из: 1 – Приверхоянского краевого прогиба, 2 – Чекуровской антиклинали, 3 – Тасаринской синклинали, 4 – Юттыхской антиклинали, 5 – Центрально-Хараулахского синклинали, 6 – Кенгейского грабена.



ПРИЛОЖЕНИЕ 3

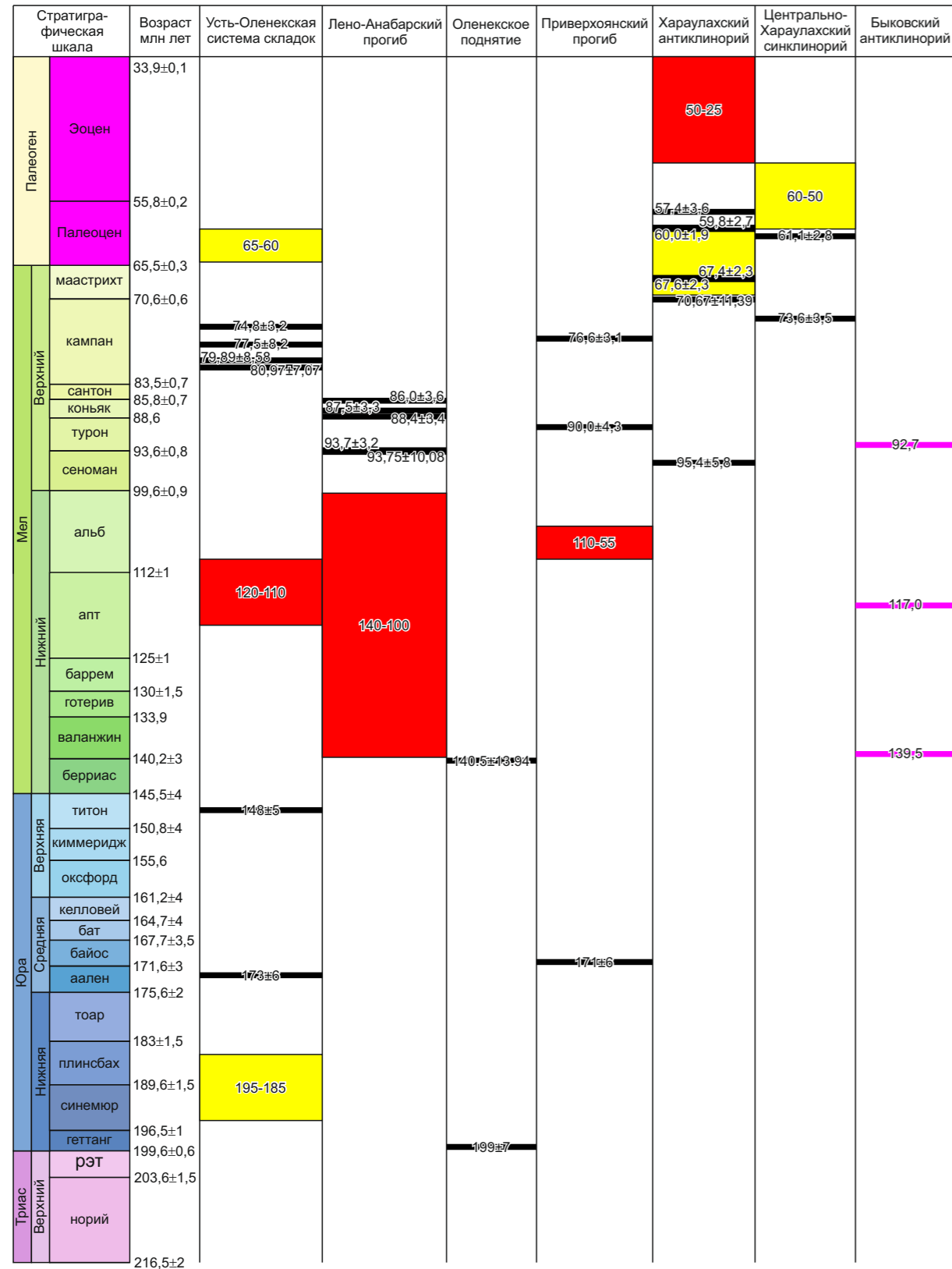


Рис. 12. Основные установленные мезозойско-кайнозойские термально-тектонические события на северо-востоке Сибирской платформы и прилегающих районах Верхоянского складчато-надвигового пояса. 1-3 – скорость погружения: 1 – 7 С/млн лет, 2 – 1-2 С/млн лет, 3 – <1 С/млн лет; 4-5 – скорость денудации (остывания): 4 – >10 С/млн лет, 5 – 5-10 С/млн лет; 6 – AFT возраста; 7 – (U-Th)/He возраста.

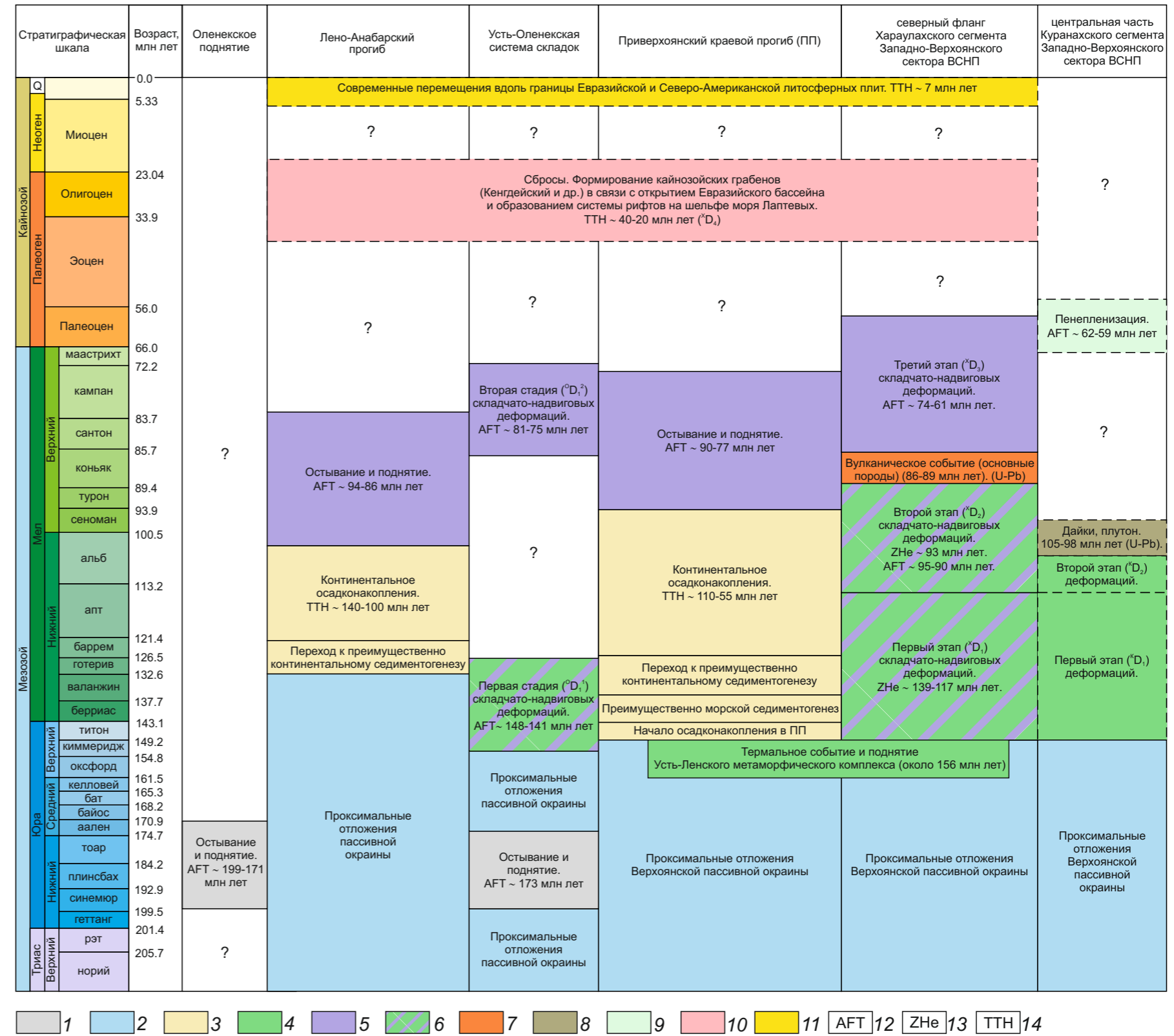


Рис. 13. Корреляция термальных и тектонических событий на северо-востоке Сибирской платформы и в прилегающих районах Верхоянского складчато-надвигового пояса (ВСНП). 1 – Таймыро-Североземельская орогения, 2 – Верхоянская пассивная континентальная окраина, 3 – осадконакопление в Приверхоанском и Лено-Анабарском прогибах Сибирской платформы, 4 – Верхоянская орогения, 5 – Новосибирско-Чукотская орогения, 6 – совместное влияние Верхоянской и Новосибирско-Чукотской орогений, 7 – позднемеловое магматическое событие на севере ВСНП, 8 – магматическое событие на рубеже раннего и позднего мела; 9 – предполагаемая пенепленизация в центральной части Куранахского сегмента, 10 – раскрытие Евразийского бассейна, 11 – современные перемещения вдоль границы Евразийской и Северо-Американской литосферных плит, 12 – результаты трекового датирования (AFT – apatite fission-track), 13 – результаты (U-Th)/He датирования (ZHe – zircon-helium), 14 – интерпретация графиков термальной эволюции (ТТН – time-temperature history).