



На правах рукописи

ВЕТРОВ Евгений Валерьевич

**ЭВОЛЮЦИЯ ТЕРМОТЕКТОНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ЮГО-ВОСТОЧНОГО АЛТАЯ В ПОЗДНЕМ МЕЗОЗОЕ И КАЙНОЗОЕ ПО ДАННЫМ ТРЕКОВОЙ ТЕРМОХРОНОЛОГИИ АПАТИТА**

специальность 25.00.03 - геотектоника и геодинамика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

МОСКВА – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

**Буслов Михаил Михайлович**, доктор геол.-мин. наук, заместитель директора, заведующий Лабораторией геодинамики и магматизма

Официальные оппоненты:

**Худолей Андрей Константинович**, доктор геол.-мин. наук, профессор, заведующий кафедрой региональной геологии Санкт-Петербургского государственного университета г. Санкт-Петербург

**Прокопьев Андрей Владимирович**, кандидат геол.-мин. наук, заместитель директора по научной работе, заведующий Лабораторией геодинамики и региональной геологии ФГБУН Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

**Ведущая организация:**

ФГБУ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

Защита состоится «12» мая 2016 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета Д 002.215.01 при ФГБУ Геологическом институте РАН по адресу: 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7

С диссертацией можно ознакомиться в Библиотеке геологической литературы по адресу: 119017 Москва, Старомонетный пер., д. 35. ИГЕМ РАН и на сайте ГИН РАН [http://www.ginras.ru/struct/21/20/files/dissertacia\\_Vetrov.pdf](http://www.ginras.ru/struct/21/20/files/dissertacia_Vetrov.pdf)

Автореферат разослан «    » марта 2016 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.215.01

к.г.-м.н., с.н.с. ГИН РАН

Патина И.С.

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность исследования

Юго-восточная часть Горного Алтая хорошо изучена различными геологическими и геофизическими методами [Девяткин, 1965; Добрецов и др., 1995; Дельво и др., 1995; Новиков и др., 1995; Зыкин, Казанский, 1995; Буслов и др., 1999, 2003, 2013; Гольдин и др., 2003, 2008; Агатова и др., 2008; Деев и др., 2012; Неведрова и др., 2001, 2011, 2014]. Весомый вклад по изучению строения и условий формирования, стратиграфическому расчленению, палеонтологической характеристике кайнозоя и геологической истории Юго-Восточного Алтая был сделан в 60-х годах Г.Ф. Лунгерсгаузенем, О.А. Раковец и Е.В. Девяткиным, разработавшими детальную стратиграфическую схему [Девяткин, 1965]. При этом, несмотря на высокую степень геологической изученности и хорошо обоснованную реконструкцию кайнозойского осадконакопления в межгорных впадинах, до сих пор имеются лишь общие представления об этапах роста и денудации горных сооружений Горного Алтая и их связи с глобальными и локальными процессами горообразования во внутренней части Евразии.

Решение подобных вопросов в настоящий момент в мировой практике основывается, в том числе, на данных трекового анализа апатита. Этот метод позволяет решать широкий диапазон задач: оценка скоростей воздымания горных систем; реконструкция истории заполнения осадочных бассейнов; палеогеографические реконструкции; абсолютное датирование импактитов и вулканитов (при условии отсутствия наложенного термального воздействия) и т.д. [Соловьев, 2008; Lisker et al., 2009]. Основным достижением в развитии метода трекового анализа апатита является совершенствование алгоритмов для моделирования термотектонических процессов, которые направлены на улучшение интерпретации и более точную количественную оценку денудационных процессов. Кроме актуализации алгоритмов для создания термальных историй, которые моделируются при компьютерной обработке первичных аналитических параметров, разработана стратегия представления конечных результатов. Таким образом, современный набор данных трековой термохронологии в сочетании с разработанными алгоритмами позволяют пространственно визуализировать

эволюцию геологических, тектонических и геоморфологических событий в региональном масштабе, а иногда в масштабе континента [Kohn et al., 2005].

В последние десятилетия исследования тектонических процессов в условиях верхней континентальной коры методами низкотемпературной термохронологии, к которым относится метод трекового анализа апатита, вышли на принципиально новый уровень. Экспериментальные исследования кинетики диффузии (и отжига) привели к развитию аналитических, интерпретационных подходов и алгоритмов моделирования [Reiners et al., 2005]. Созданы базы данных, включающие в себя результаты аналитических исследований в региональном масштабе и масштабе континента [Kohn et al., 2002, 2005; Gleadow et al., 2002].

За последние годы усовершенствованы способы представления результатов трекового анализа апатита. Австралийскими термохронологами из Университета Мельбурна (Австралия) предложен алгоритм обработки большого набора аналитических данных, который позволяет моделировать верхнекоровые термотектонические процессы. По этому алгоритму визуализируется динамика остывания поверхности фундамента посредством представления серии изображений распределения палеотемператур с определенным временным интервалом. В таком же формате представляется хронология денудационных событий: на этой серии изображений отображаются объемы денудированных толщ для определенного отрезка времени. Завершающей стадией термотектонического моделирования является реконструкция палеорельефа.

Данный метод исследования востребован при изучении сложно построенных тектонических сооружений внутриконтинентальных горных областей с многоэтапной историей развития, таких как Горный Алтай, и позволяет восстановить хронологию тектонических процессов и реконструировать эволюцию рельефа.

**Целью исследований** является изучение термотектонических событий юго-восточной части Горного Алтая в мезозойско-кайнозойское время по данным низкотемпературной термохронологии апатита.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести трековое датирование апатитов из палеозойских пород юго-восточной части Горного Алтая.

2. Построить тренды термальных историй Курайского, Южно-Чуйского, Шапшальского хребтов, Чаган-Узунского массива, Чулышманского высокогорного плато и основания Курайско-Чуйской впадины Юго-Восточного Алтая.
3. Провести количественную оценку скоростей и объемов денудации исследуемой территории за последние ~100 млн лет.
4. Построить пространственно-временные модели, отражающие динамику остывания земной поверхности, интегрированную денудационную хронологию, эволюцию рельефа Юго-Восточного Алтая за последние ~100 млн лет.

### **Методы исследования**

Выделение монофракций апатита проводилось в лаборатории изотопно-аналитических методов №775 ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева. Подготовка образцов, включающая изготовление шашек и травление, осуществлялась в Гентском Университете (Бельгия) на факультете минералогии и петрологии под руководством профессора Йогана Де Гравэ. Облучение образцов проходило путем воздействия термальными нейтронами в реакторе «Тетис» Гентского Университета. Подсчет треков и измерение их длин были проведены с использованием микроскопа Olympus VH-2 (1250-кратное увеличение), оснащенным проходящим и отраженным светом. Для каждого образца было подсчитано около 1000 спонтанных треков как минимум в 20 зернах.

Моделирование термальных историй по данным трекового анализа апатита было проведено при помощи программного обеспечения AFTSolve [Ketcham et al., 2000] и HeFTy [Ketcham et al., 2005]. Пространственно-временные модели, позволяющие визуализировать термотектонические события, были построены с помощью инструментов ArgMap 9.3.

**Объектами данного исследования** послужили палеозойские, главным образом, магматические породы Юго-Восточного Алтая (Курайского, Южно-Чуйского, Шапшальского хребтов, основания Курайской впадины, Чулышманского плато, Чаган-Узунского выступа).

### **Фактический материал**

В основу работы положен материал, полученный автором в ходе экспедиционных работ 2009-2012 гг. и дополненный образцами научного руководителя М.М. Буслова. Было отобрано более 100 образцов на трековый анализ апатита из пород юго-восточной части Горного Алтая. В работе при интерпретации автором данной работы использовано 46 датировок (около 1100 определений отдельных зерен), построено 32 модели термальных историй. Работы проводились в тесном сотрудничестве с бельгийскими геохронологами Гентского Университета профессором Йоганом Де Гравэ и доктором Стейном Глори.

Результаты аналитических работ, полученные непосредственно автором (9 датировок и 7 моделей термальных историй), уточняют эволюцию формирования Курайского хребта и Чулышманского плато и обеспечивают новыми данными историю формирования Чаган-Узунского выступа.

### **Научная новизна работы**

В диссертационной работе впервые для одного из районов Горного Алтая реализован и апробирован новый подход к анализу и интерпретации регионального набора данных трековой термохронологии апатита. Впервые получены данные термотектонической истории Чаган-Узунского выступа, которые свидетельствуют о существовании единого Курайско-Чуйского озерного бассейна с эоцена до позднего неогена. Проведен анализ регионального набора трековых возрастов апатита и средних трековых длин, который позволил выявить области термального воздействия, связанные, главным образом, с современными проявлениями сейсмической активности на территории Юго-Восточного Алтая. Построена пространственно-временная модель денудационной хронологии, по анализу которой, установлены этапы тектонической активности, как отдельных разломных структур, так и региона в целом для позднемезозойско-кайнозойского времени. Реконструирована и визуализирована позднемезозойско-кайнозойская история формирования рельефа Юго-Восточного Алтая.

### **Практическая значимость работы**

Результаты моделирования термотектонических событий Юго-Восточного Алтая могут быть применены при геолого-съёмочных и тематических работах, в том числе, при изучении периодов активизации разломных структур, выявлении этапов

пенепленизации, составлении тематических (главным образом, тектонических) карт, реконструкции мезозойско-кайнозойской истории формирования рельефа.

Предложенный в диссертационной работе способ выявления современных тектонически активных областей может быть применен для других территорий Горного Алтая и Центральной Азии в целом и использоваться в хозяйственной деятельности, например, в строительстве при оценке сейсмичности данного региона.

#### **Защищаемые положения:**

1. Анализ региональных моделей распределения трековых параметров (трековых возрастов апатита и средних трековых длин) позволяет выявить современные тектонически активные области и оценить сейсмические риски в пределах юго-восточной части Горного Алтая.
2. Термальные истории пород основания и горного обрамления Курайско-Чуйской впадины коррелируют с мощностью кайнозойских осадков, выполняющих впадину, и сменой обстановок их седиментации.
3. На основе анализа изменения региональной скорости денудации выявлены три этапа тектонической эволюции юго-восточной части Горного Алтая:
  1. позднемеловой – раннепалеогеновой тектонической активизации
  2. среднепалеогеновой – раннеогеновой стабилизации с формированием поверхности выравнивания;
  3. неоген-четвертичной тектонической активизации «ступенчатого» характера.

#### **Апробация работы и публикации**

Различные положения работы обсуждались на следующих конференциях и совещаниях: международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс», г. Новосибирск (2012 год); Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту), г. Иркутск, (2013 г, 2015 г); Всероссийский форум «Развитие минерально-сырьевой базы Сибири: от В.А. Обручева, М.А. Усова, Н.Н. Урванцева до наших дней», г. Томск, 2013 г; III Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург,

2013 г; V международный симпозиум «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов», г. Бишкек, 2014 г; XLVI Тектоническое совещание «Тектоника складчатых поясов Евразии: сходство, различие, характерные черты новейшего горообразования, региональные обобщения», г. Москва, 2014 г; VII Сибирская научно-практическая конференция молодых ученых по наукам о Земле, г. Новосибирск, 2014 г; IV Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург, 2015 г.

По теме диссертации опубликовано две статьи в реферируемых журналах и одна в продолжающемся издании из списка ВАК и десять тезисов докладов.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы общим объемом 200 страниц машинописного текста, который иллюстрируется 64 рисунками. Список литературы включает в себя 134 наименования.

Работа выполнена в Лаборатории геодинамики и магматизма №212 ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева при поддержке и деятельном участии научного руководителя д.г.-м.н. М.М. Буслова. Трековое датирование территории Горного Алтая в последние 25 лет осуществлялось в рамках совместных российско-бельгийских проектов, организованных академиком Н.Л. Добрецовым и профессором Я. Клерксом.

Автор искренне благодарен научному руководителю д.г.-м.н. М.М. Буслову за выбор объектов исследования и предоставленную коллекцию образцов. За огромный вклад в понимание автором методики трекового анализа апатита и поддержку при проведении аналитических работ автор выражает признательность Д.А. Кох, Е.В. Солобоевой, Йогану Де Гравэ, Илин Де Пилсмейкер (Гентский Университет, Бельгия). Автор глубоко признателен коллегам лаборатории «Геодинамики и магматизма» (д.г.-м.н. А.Д. Ножкину, д.г.-м.н. И.С. Новикову, к.г.-м.н А.В. Котляров, к.г.-м.н С.В. Зиновьеву, А.В. Куликовой, Е.С. Рубановой и др.) за творческую атмосферу и плодотворные обсуждения результатов работы, к.г.-м.н А.В. Травину, к.г.-м.н А.В. Вишневскому, к.г.-м.н И.А. Вишневской, Е.А. Кариковскому за ценные замечания и техническую поддержку при оформлении работы, Д.А. Немущенко, А.В. Медведь, П.Д. Котлеру, Е.И. Михееву за поддержку на стадии обучения.

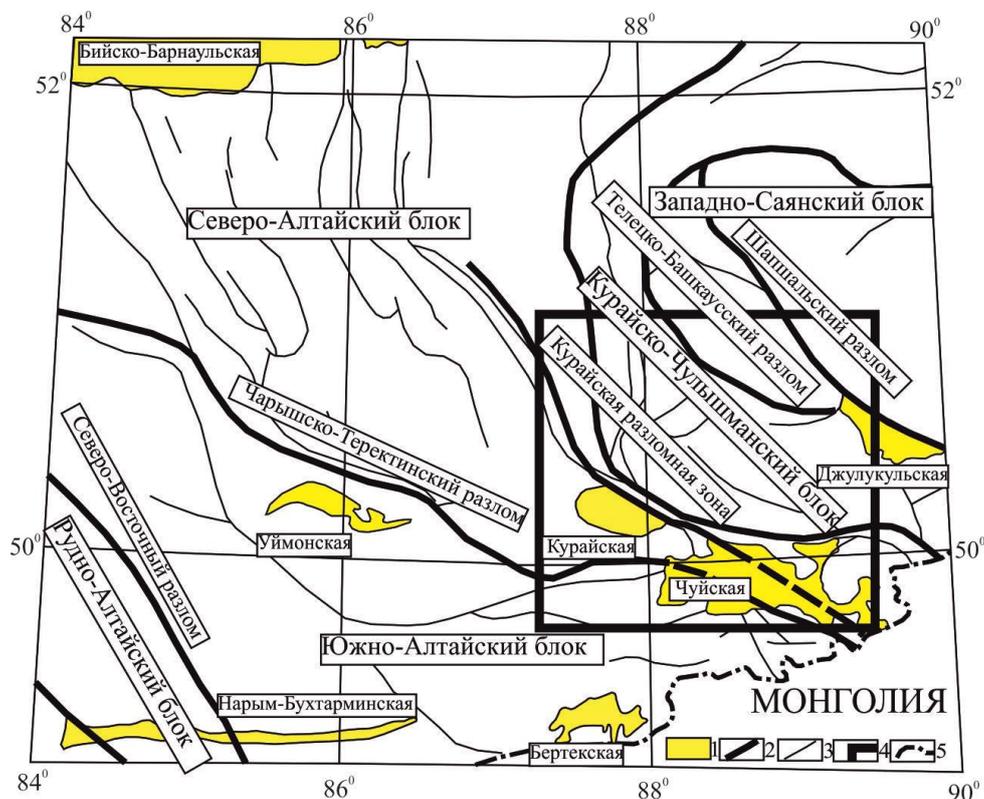
Особенно хочется поблагодарить за ценные советы и неизменную поддержку на всех этапах исследования д.г.-м.н. Е.Ф. Летникову, к.г.-м.н А.Р. Агатову, к.г.-м.н Р.К. Непоп, к.г.-м.н Ф.И. Жимулева, за неоценимую всестороннюю помощь сотрудников АО «СНИИГГиМС» д.г.-м.н. Г.А. Бабина, к.г.-м.н А.И. Черных. И, конечно, работа не была бы написана без понимания и поддержки любимой семьи.

## **Глава 1. ЮГО-ВОСТОЧНЫЙ АЛТАЙ: ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ В СОСТАВЕ ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА**

Горный Алтай является частью крупнейшей в мире Центрально-Азиатской внутриконтинентальной горной области. Она протягивается от зоны активных деформаций Индо-Евразийской коллизии (Гималаи, Памир, Тибет) на север через Тянь-Шань, включает горные пояса Южной Сибири и Байкальскую рифтовую зону Восточной Сибири. Северным ограничением деформационного фронта является Сибирский (Северо-Азиатский) кратон. Структура основания Центральной Азии состоит из множества разновеликих докембрийских микроконтинентов гондванской группы, окруженных складчатыми поясами палеозойско-мезозойского возраста, которые были реактивированы в кайнозое в результате дальнего воздействия Индо-Евразийской коллизии. Передача деформаций от Индо-Евразийской коллизии на дальние расстояния происходила по «принципу домино» через жесткие структуры докембрийских микроконтинентов. В результате сжатия на месте складчатых зон сформировались горные системы, а микроконтиненты служили фундаментом для формирования кайнозойских бассейнов седиментации (Таримского, Таджикского, Джунгарского и др.) [Dobretsov et al., 1996; De Grave et al., 2007].

В результате дальнего воздействия конвергенции Индийского континента с Евразией неотектонические процессы в Центральной Азии проявились с формированием крупных литосферных складок, осложненных различными по морфологии впадинами и разделяющими их хребтами. На одних отрезках неотектонической истории впадины формировались как структуры сжатия (рампы или полурампы), на других - как структуры сдвигового растяжения (грабены, структуры типа пул-апарт) или как сдвиговые зоны без заметного выражения их в рельефе [Добрецов и др., 1995; Дельво и др., 1995].

Наиболее контрастные кайнозойские движения и деформации проявлены в юго-восточной части Горного Алтая вблизи границы с Монголией, где обособились высокогорные плато (Чулышманское и Укокское), горные системы (Курайская, Северо-Чуйская, Южно-Чуйская и другие) и впадины (Курайская, Чуйская, Тархатинская, Бертекская, Джулукульская и ряд других), (рис. 1) [Ветров и др., 2016].



**Рис.1.** Схема неотектонического районирования Горного Алтая. 1-кайнозойские впадины, 2-позднепалеозойские региональные сдвиги, 3-вторичные разломы, 4-положение территории исследования, 5-государственная граница Россия-Монголия [Ветров и др., 2016].

Из истории формирования данного региона становится видно, что заложение основных разломов, по которым впоследствии происходило основное перемещение современных блоков, произошло в карбоне [Добрецов и др. 1995]. В среднем – позднем карбоне перемещение Таримского и Северо-Китайского блока относительно Сибирской плиты вызвало прогрессивное закрытие Иртыш – Зайсанского океана между Казахстаном и Сибирью. Эта коллизия вызвала заложение гигантских сдвигов, которые были активными до Перми включительно. Крупнейшими из них на юго-востоке Алтая являются зоны Курайского и Чарышско – Теректинского разломов. Позднее, в палеогене, неогене и четвертичное время эволюция Юго-Восточного Алтая продолжалась в связи с реактивацией Чарышско-Теректинской, Курайской, Телецко-Башкауской и Шапшальской зон разломов. [Буслов и др., 1999].

Тектонические движения были значительно ослаблены в мезозое. В раннем мелу – палеоцене наступила тектоническая стабилизация в условиях гумидного субтропического климата, что привело к денудации, интенсивному химическому выветриванию и формированию каолинит – монтмориллонитовой коры выветривания [Зыкин и др., 1995]. Неотектоническая структура Горного Алтая характеризуется системой взбросов ЗСЗ-ВЮВ простирания высотой до 2500-4500 м, разделенных депрессиями, расположенными на высоте 1000-2000 м [Новиков, 1996, 2004]. Эта структура зачастую контролируется обновленными в кайнозой системами разломов, которые часто соответствуют палеозойским сутурным швам и главным зонам сдвигов. Они неоднократно испытывали активизацию, что подтверждается частым нахождением вдоль них венд-кембрийских перидотит-серпентинитовых фрагментов офиолитов, средне-позднедевонских, позднекаменноугольных и юрских линз осадочных пород [Буслов и др., 1999; Буслов, 2007].

## Глава 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ: ТРЕКОВОЕ ДАТИРОВАНИЕ

### АПАТИТА

Трековый анализ апатита (apatite fission-track dating, AFT) является методом геологического датирования, который основан на подсчете плотности треков осколков спонтанного деления ядер урана ( $^{238}\text{U}$ ), накапливающихся в минерале в ходе геологической истории [Price, Walker, 1963; Соловьев, 2008]. Наблюдение за температурой, до которой AFT система датирования остается закрытой по отношению к сохранению дочерних продуктов, позволяет определить историю экспозиции пород до высоких температур в определенных геологических условиях. Во многих случаях такие термохронометры позволяют определить кажущиеся возрасты (apparent ages), которые редко связаны со временем начала работы системы. Эти кажущиеся возрасты отражают запись термальных и тектонических процессов, которые контролируют эволюцию длительной денудации земной поверхности, а не возрасты первоначального образования или осадконакопления. В большинстве случаев, полученные кажущиеся трековые возрасты являются «смешанными» возрастными, которые отражают некоторый интегрированный результат низкотемпературной термальной истории коры. Только в относительно немногих ситуациях именно они напрямую датируют особое дискретное геологическое событие, включая быстрое

охлаждение. Поэтому, значимость региональных трековых моделей апатита не всегда очевидна и многие геологи находят эти данные нескладными и трудными для интерпретации.

Ключом в изучении термальных процессов с помощью трековых исследований является понимание кинематики процесса отжига треков, которое достигается путем экспериментов в масштабах лабораторного времени. Отжиг (annealing) треков апатита - это термально активизированный процесс, происходящий на интервалах температур обычно выше 100-120 °С. С увеличением степени отжига, треки начинают прогрессивно укорачиваться и, когда порода охладится до диапазона температур относительной трековой стабильности, треки сохраняют большую часть своей первоначальной длины. Отжиг треков контролируется температурой, таким образом, длины треков могут быть использованы для количественной оценки отжига. Каждый отдельный трек добавлен событием радиоактивного распада в различное время, и несет в себе различную долю термальной истории. Следовательно, длины отдельных треков отображают палеотемпературы, накопленные образцами за различные временные интервалы. Рассмотрение трекового возраста и данных длин вместе, отражает комбинацию времени, за которое треки сохранились и термальную историю пород за этот временной период. Поэтому, интеграция трекового возраста и параметров трековых длин может установить строгие ограничения истории охлаждения через зону частичного отжига треков (partial annealing zone, PAZ), т.е. позволяет определить, каким было охлаждение: быстрым, медленным или более сложным. Т.к. апатит это минерал, для которого параметры отжига в настоящее время является наиболее понятной, т.к. он обычно содержит уран в пределах 1-100 г/т и является общим аксессуарным минералом во многих типах пород, трековая термохронология апатита является почти универсальным методом, доступным для больших территорий континентальной коры Земли.

### **Глава 3. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ТРЕКОВОГО АНАЛИЗА АПАТИТА**

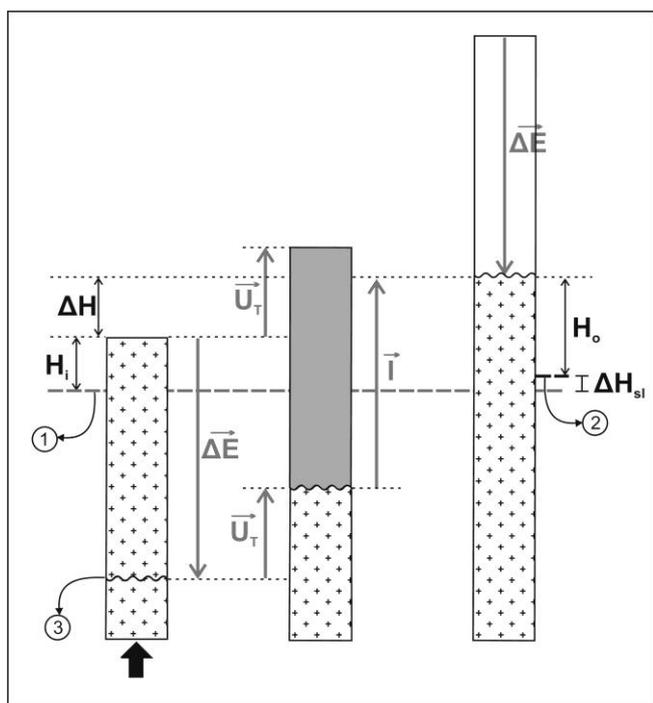
С помощью данных трековой термохронологии возможен анализ событий охлаждения горных пород в обстановке верхней континентальной коры. Для понимания результатов трекового анализа были определены термины, такие как денудация (эрозионная, тектоническая), эксгумация и поднятие (поверхности, коры,

поднятие образца) [England and Molnar, 1990], которые в дальнейшем были разъяснены [Summerfield, 1991; Summerfield, Brown, 1998]. В соответствии с вышеперечисленными работами термин *поднятие поверхности (surface uplift)* обозначает изменения в абсолютной высоте поверхности. Оно равно разности поднятия образца и эксгумации. Термин *поднятие образца (sample uplift)* отражает изменения в вертикальном положении пород по отношению к уровню моря. *Денудация (denudation)* и *эксгумация (exhumation)* являются результатом удаления материала с земной поверхности для региона и для точки, соответственно. Т.е. эксгумация относится к удалению материала для определенной точки (единичный образец или вертикальный разрез), а термин *денудация* применим к площади. Началом системы отсчета для эксгумации и денудации является земная поверхность. Денудация появляется в ответ на эрозию и/или тектонику. *Эрозионная денудация* характеризует удаление продуктов выветривания геоморфологическими агентами. *Тектоническая денудация* обычно появляется в обстановках растяжения и сбросообразования, которые могут привести к удалению большого объема пород [Lisker et al., 2009].

Поднятие поверхности - это главный параметр, измеряемый для извлечения информации о тектонических силах, действующих в горных поясах [England, Molnar, 1990; Abbott et al., 1997]. Термин "*тектоническое поднятие (tectonic uplift)*" используется тогда, когда движущая сила вертикальных движений тектонического происхождения. В большинстве случаев это тектоническое поднятие, достигнутое утолщением коры с горизонтальным укорочением, которое контролируется скоростями движения тектонических плит [Harrison, 1994]. В самом большом масштабе движения плиты проявляется за счет циркуляции и конвекции в мантии. Эти плотностные дифференциации компенсируются изостатически, и полученные латеральные вариации среднего значения вертикального нормального стресса на вертикальную плоскость являются движущей силой [England, Molnar, 1990].

Удаление материала с поверхности подразумевает удаление массы из корового сегмента литосферы, образуя нарушение плотностного равновесия, которое затем компенсируется изостатическим откликом, но при этом скорости денудации ничего не говорят о скоростях поднятия поверхности [England, Molnar, 1990]. Более того, большие высоты это не основной показатель в пользу высоких скоростей эрозии. На

самом деле, разность в высотах, рассмотренная на определенном горизонтальном отрезке (профиле рельефа), играет ключевую роль в этом вопросе. Рельеф главным образом зависит от флювиального или гляциального вреза и, следовательно, также управляется климатом [Sugai, Ohmori, 1999]. С другой стороны, изменение рельефа в комбинации с изостатическим откликом может также вызвать так называемое изостатическое поднятие горных вершин или поднятие гребня. Например, этот процесс отвечает за 20-30% поднятия пиков в Гималайском орогене [Montgomery, 1994]. Изостатическая компонента обусловлена эрозионной разгрузкой определенного столба пород и может быть связана с речным врезом, который в свою очередь связан с климатическими изменениями, иногда вызванными ростом самого орогена [Willett, 1999; Hartshorn et al., 2002]. Вклад изостатической реакции определяется по [Brown, 1991] (**рис.2**):  $\Delta H = U_t + I + \Delta E$ , где  $\Delta H$  представляет разность абсолютной высоты между начальным положением (до тектонического поднятия) и современным положением (после тектонического поднятия).  $U_t$  - это вектор тектонического поднятия, перпендикулярный к начальному уровню (до тектонического поднятия), который имеет положительное значение, направленное вверх.  $I$  - это составляющая изостатической реакции, также положительного значения, направленное вверх.  $\Delta E$  - это вектор денудации, который имеет положительное значение, направленное вниз. Дальнейшее осложнение состоит в том, что многие из процессов, описанные выше, находятся в сложном динамическом взаимодействии; широкомасштабное поднятие поверхности, например, может вызвать климатические изменения, которые в свою очередь изменяют скорости эрозии и, следовательно, скорости денудации. Поднятие Тибетского плато является показательной иллюстрацией того факта, что отразилось в резком изменении модели атмосферной циркуляции в Азии, что привело к влажному муссонному климату в Юго-Восточной Азии и аридным условиям в Центральной Азии.



**Рис. 2.** Взаимосвязь между тектоническим поднятием ( $U_T$ ), денудацией ( $\Delta E$ ) и изостатическим откликом ( $I$ ).  $H_o$  - современная высота поверхности (3) по отношению к современному уровню моря (2).  $H_i$  - палеовысота столба породы по отношению к палеоуровню моря (1).  $\Delta H$  - разница высот между палеоповерхностью и современной поверхностью,  $\Delta H_{sl}$  - изменение уровня моря [Brown, 1991].

#### Глава 4. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕРМОТЕКТОНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПО ДАННЫМ ТРЕКОВОГО АНАЛИЗА АПАТИТА

Измеренные данные по трекам и построенные по этим данным термальные истории могут быть визуализированы посредством термотектонического моделирования, которое основывается на количественном понимании динамики отжига треков [Laslett et al., 1987]. Термотектоническое моделирование заключается в создании серий изображений, которые отображают региональное распределение трековых параметров (трековых возрастов и средних трековых длин), интегрированные в пространстве термальные и денудационные истории, эволюцию палеорельефа. Распределение трековых возрастов и трековых длин должно демонстрировать общие тенденции в региональном масштабе, отображающие характер поднятия образцов через зону частичного отжига. Области с минимальными значениями трековых возрастов могут трактоваться как более позднее пересечение коровой изотермы  $100^{\circ}\text{C}$  относительно прилегающих территорий с максимальными значениями. В свою очередь трековые длины определяют время нахождения образца

в температурном интервале зоны частичного отжига (60-90<sup>0</sup>С): наиболее длительное пребывание в этой зоне дает широкое распределение укороченных длин треков.

Стратегия дальнейшего моделирования описана в серии работ [Kohn et al., 2002; Gleadow et al., 2002; Kohn et al., 2005] для Южной Канады, Южной Африки, Восточной Африки, Австралийского континента. Значения палеотемператур определяются для определенного момента времени во всех местах отбора образцов и изображаются на схеме в виде палеоизотерм. Серия таких изображений для близких временных отметок, при условии, что все образцы были отобраны с поверхностных пород фундамента, демонстрирует динамику и характер остывания поверхности фундамента в региональном масштабе. Термальная история региона конвертируется в денудационную хронологию с учетом геотермального градиента, который в среднем составляет 25-30<sup>0</sup>С. Серия денудационных изображений отображает объемы материала, денудированного за выбранный интервал времени, а, следовательно, и скорость денудации с привязкой к абсолютной геохронологической шкале. С помощью комбинации данных о денудации с данными цифровой модели рельефа моделируется эволюция палеотопографии. Палеотопография оценивается с помощью последовательного вычитания количества материала, удаленного денудацией в определенный период времени на текущей поверхности, из современной поверхности рельефа с учетом изостатического равновесия. Это достигается с помощью использования региональной гибкой изостазии при использовании модели тонкой плиты с эффективной эластичной мощностью 25 км. Такие реконструированные значения палеовысот необходимо интерпретировать с некоторой осторожностью, т.к они отражают только пассивный ответ на денудационную разгрузку и не отображают возможные сопутствующие эпизоды тектонического поднятия, падение уровня моря относительно современной поверхности земли или корректировку тектонических движений для локальной деформации и/или надвигообразования [Kohn et al., 2005].

## **Глава 5. ТЕРМОТЕКТОНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЮГО-ВОСТОЧНОГО АЛТАЯ**

Полученные трековые возрасты попадают в интервал от 60 до 150 млн лет с концентрацией относительно более молодых возрастов в зоне Курайско-Чуйского прогиба и около Телецкого грабена. Эта аномальная зона означает более позднее пересечение коровой изотермы 100<sup>0</sup>С относительно прилегающих территорий и,

следовательно, более позднее вертикальное поднятие. На карте распределения средних трековых длин аномальная зона (более теплые тона) с низкими значениями (12 мкм) означает задержку массивов в зоне частичного отжига, зеленые оттенки – относительно быстрый вывод пород на поверхность. Выделенная по трековым параметрам зона коррелирует с современной сейсмически активной областью, которая выделена геофизическими наблюдениями за последние 50 лет: эпицентры крупнейших землетрясений и афтершоков сконцентрированы в районе Курайско-Чуйского прогиба (**прил.1А**) [Ветров и др., 2016].

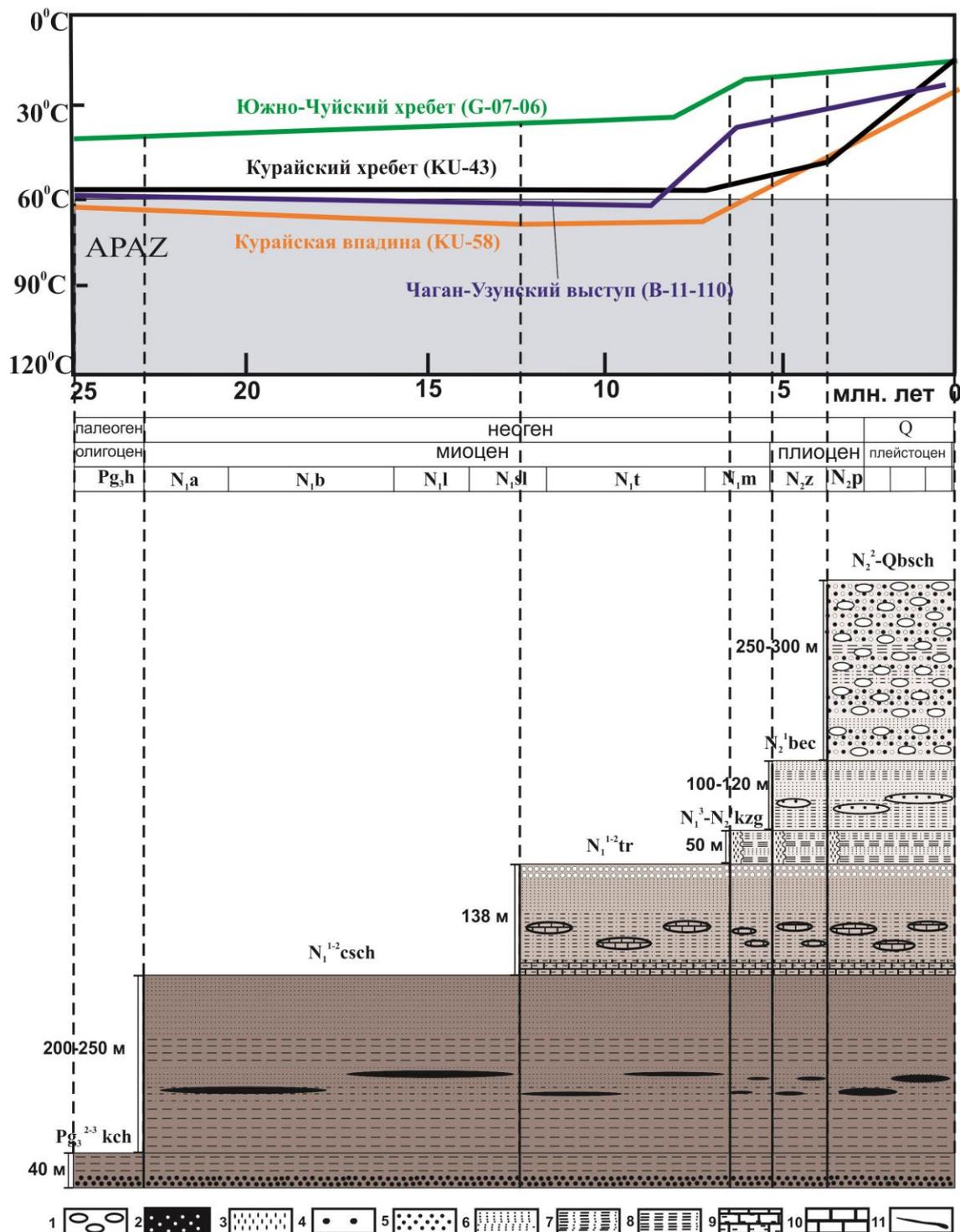
Проведена корреляция моделей термальных историй пород основания Курайской впадины, Чаган-Узунского выступа, Курайского и Южно-Чуйского хребтов с историей накопления кайнозойских осадков Курайско-Чуйской впадины (**рис.3**). Кайнозойская история осадконакопления отчетлива коррелирует с трендами термальных историй. Погружение  $t, T$ -тренда образца, взятого из основания Курайской впадины, соответствует углублению впадины и смене болотных отложений кошагачской свиты более глубоководными отложениями туерькской и кызылгирской свит. Воздымание  $t, T$ -трендов для пород горного обрамления Курайско-Чуйской впадины, фиксирующее интенсивный рост горных систем, коррелирует с этапом накопления грубообломочных отложений бекенской и башкаусской свит.

Результаты моделирования термальных историй образцов отражают региональную историю охлаждения пород, вышедших на дневную поверхность, во время их транспортировки в верхней коре.

Динамика остывания территории неоднородна, однако выявляются общие закономерности. Наиболее быстрое охлаждение произошло во временном интервале с 95 до 75 млн лет и за последние 15 млн лет. Относительно стабильное положение палеоизотерм отмечается в интервале от 55 до 25 млн лет (**прил.1Б**) [Ветров и др., 2016].

На территории Юго-Восточного Алтая выделяются три этапа с различными показателями объемов (скоростей) денудации за последние 95 млн лет. Во время первого этапа (95-55 млн лет) наиболее мощной денудации была подвержена зона сочленения Чарышско-Теректинского и Курайского разломов. Показатели денудации для других участков территории незначительны. Во время второго этапа (55-15 млн

лет) вся территория Юго-Восточного Алтая прибывала в стабильном тектоническом



**Рис. 3.** Эволюция накопления осадков Курайско-Чуйской впадины (корреляционная схема стратиграфических данных и результатов трекового анализа) по [Ветров и др., 2016] с дополнениями автора. 1-валуники, 2-гравийно-песчаный материал, 3-гравий, 4-галечник, 5-пески, 6-алевролиты, 7-глины, 8-мергели, 9-известняки, 10-бурый уголь. Свиты: kch-карачумская, csch- кош-агачская, tr- туерыкская, kzg-кылгирская, bec-бекенская, bshk- башкауская.

состоянии с минимальными объемами денудации, только в интервале 25-15 млн лет в денудационной хронологии появляются незначительно повышенные объемы денудации пород Курайско-Чулышманского блока на фоне общей тектонической стабильности.

Последние 15 млн лет (третий этап) – активная реактивация разломных зон Юго-Восточного Алтая с максимальными объемами денудации в зоне Курайско-Чуйского прогиба (**прил.1В**) [Ветров и др., 2016].

При термотектоническом моделировании учитываются только расчеты вертикальных движений, полученные по данным трекового датирования, однако используемый подход имеет большой потенциал в восстановлении эволюции рельефа на протяжении почти 100 млн лет (**прил.1Г**). С 95 до 65 млн лет территория Юго-Восточного Алтая развивалась как выровненная поверхность с приподнятой северо-восточной областью (район Шапшальского хребта Западно-Саянского блока). Временной интервал 55-25 млн лет характеризуется равномерной денудацией территории и отсутствием каких-либо тектонических поднятий. За последние 15 млн лет произошла мощная денудация пород Южно-Алтайского и Западно-Санского блоков, в то время как Курайско-Чулышманский блок подвергся минимальной денудации пород [Ветров и др., 2016].

Современная орография юго-восточной части Горного Алтая была сформирована за последние 5 млн лет. В этот период времени были сформированы максимально высокие горные системы и межгорные впадины, в которых произошло накопление моласс бекенской и башкаусской свит, мощностью до 300 метров [Девяткин, 1965; Зыкин, Казанский, 1995]. В период 12-5 млн лет произошло накопление озерных отложений туерыкской и кызылгирской свит, суммарной мощностью до 200 м. Озерные отложения сохранились в Курайско-Чуйской впадине, и, вероятно, распространялись гораздо шире. Судя по результатам термотектонического моделирования крупные озера существовали в миоценовое время как в южной (район Укокского плато), так и в северной (Чулышманское плато) частях региона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена эволюция термотектонических событий Юго-Восточного Алтая в мезозойско-кайнозойское время по данным трекового анализа апатита. Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. На территории юго-восточной части Горного Алтая в региональной денудационной хронологии пород основания Курайско-Чуйской впадины и ее горного обрамления проявлены три тектонических этапа: 1. позднемеловая – раннепалеогеновая тектоническая активизация; 2. среднепалеогеновая – раннеэоценовая стабилизация с формированием поверхности выравнивания; 3. неоген-четвертичная тектоническая активизация.
2. Сходство термальных историй образцов из Курайско-Чуйской впадины и Чаган-Узунского выступа с эоцена до позднего неогена указывает на существование единого Курайско-Чуйского бассейна, который был разделен Чаган-Узунским выступом на две впадины в позднем неогене.
3. На основе анализа термальной истории пород основания Курайской впадины определен миоценовый этап погружения фундамента (проседания) Курайско-Чуйской впадины со скоростью 16-20 м/млн лет; во время этого этапа произошла смена режима седиментации во впадине, где болотные отложения сменились глубоководными озерными отложениями.
4. Поступление в Курайско-Чуйскую впадину грубообломочного материала в плиоцене связано с ростом горного обрамления впадины, скорость которого определяется скоростью денудации хребтов (до 270 м/млн лет).
5. Региональные модели распределения трековых параметров (трековых возрастов апатита и средних трековых длин) отражают современные тектонически активные области и области с повышенным тепловым потоком.
6. Эволюция формирования рельефа юго-восточной части Горного Алтая, реконструированная в ходе термотектонического моделирования, предполагает существование крупных миоценовых озер на месте современных хребтов и плато.
7. На основе анализа результатов термотектонического моделирования установлено, что территория современного Чулышманского плато испытала поднятие в раннем миоцене и тем самым разделила единый озерный бассейн на

серию мелких впадин. Современное положение кайнозойских осадков (Курайской, Чуйской, Джулукульской, Сорулукольской впадин) приурочено к периферии пра-Чулышманского поднятия. Нахождение неогеновых осадков на поверхности современного плато маловероятно вследствие длительной интенсивной денудации.

## **СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

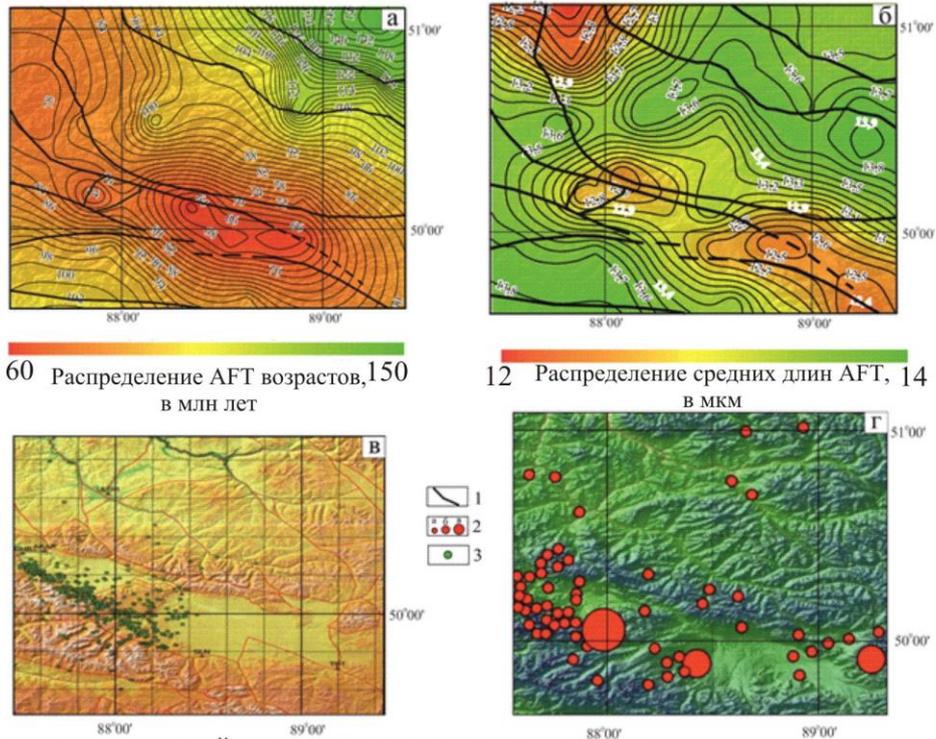
Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Ветров Е.В., Буслов М.М., И.Де Гравэ. Эволюция тектонических событий и рельефа юго-восточной части Горного Алтая в позднем мезозое-кайнозое по данным трековой термохронологии // Геология и геофизика. 2016. т.57. №1. С.125-142
2. Pelsmaeker E. De, Glorie S., Buslov M. M., Zhimulev F. I., Poujol M., Korobkin V. V., Vanhaecke F., Vetrov E. V., Grave J. De. Late-Paleozoic emplacement and Meso-Cenozoic reactivation of the southern Kazakhstan granitoid basement// Tectonophysics. 2015. v.662. P.416-433
3. Буслов М.М., Солобоева Е.В., Ветров Е.В. Взаимосвязи формирования мезозойских орогенов и осадочных бассейнов Центральной Азии и Сибири // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории. 2013. Т.1. с. 125-127

Материалы конференций и тезисы докладов

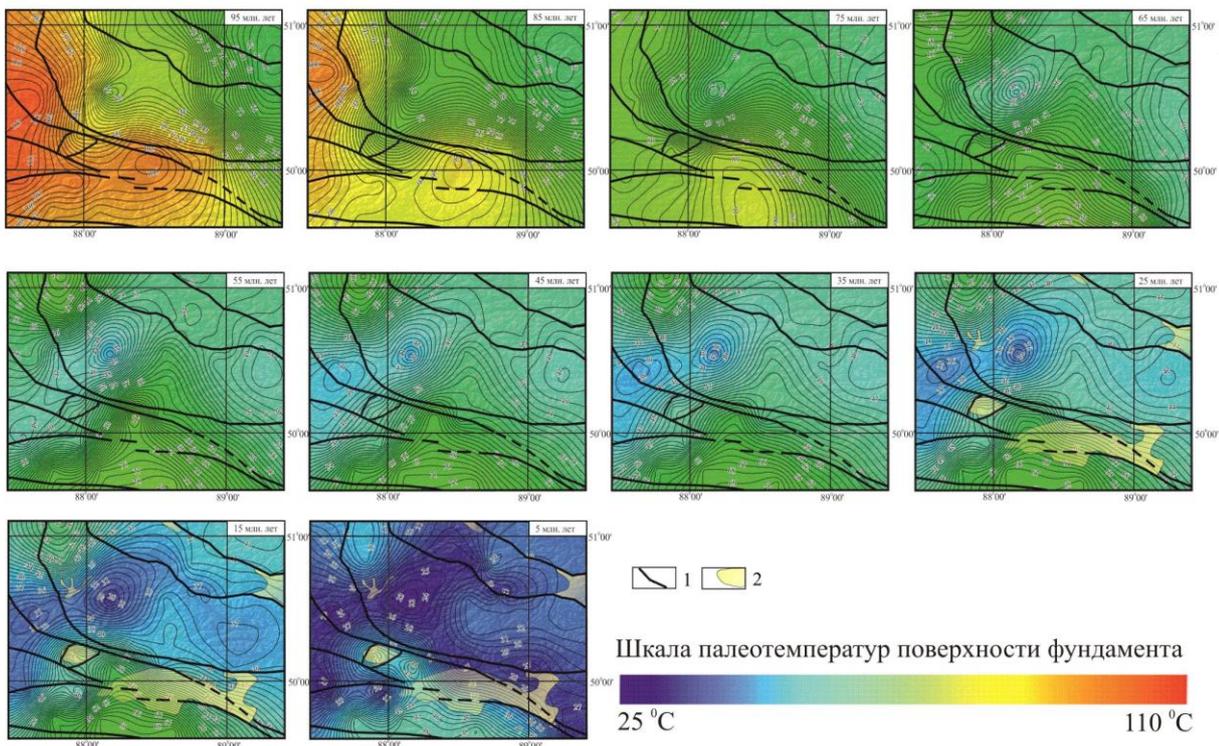
1. Ветров Е.В., Буслов М.М., Де Гравэ И. Эволюция тектонических событий и рельефа юго-восточной части Горного Алтая в позднем мезозое-кайнозое по данным трековой термохронологии апатита // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). 2015. В. 13. с. 31-33.
2. Ветров Е.В. Мезозойско-кайнозойская эволюция тектонических процессов юго-восточной части Горного Алтая по данным трековой термохронологии // IV Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского. 2015. С. 11-14.
3. Ветров Е.В. Изучение термо-тектонических процессов по данным трековой термохронологии на примере Юго-Восточного Горного Алтая // VII Сибирская научно-практическая конференция молодых ученых по наукам о Земле. 2014. С. 118-119.
4. Ветров Е.В. Термо-тектоническая эволюция юго-восточной части Горного Алтая в мезозойско-кайнозойское время по данным трекового анализа апатита (АФТ) // Тектоника складчатых поясов Евразии: сходство, различие, характерные черты новейшего горообразования, региональные обобщения. 2014. С. 45-48
5. Буслов М.М., Дельво Д., Де Гравэ Й., Баталева Е.А., Ветров Е.В. Модель формирования земной коры Тянь-Шаня и Алтае-Саяна и закономерности ее эволюции в процессе Индо-Евразийской коллизии // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. 2014. С. 23-25

6. Ветров Е.В. Эволюция тектонических процессов и рельефа юго-восточной части Горного Алтая в кайнозое на основе данных трекового датирования: эффект дальнего воздействия Индо-Евразийской коллизии // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. 2014. С. 26-28
7. Ветров Е.В. Трековый анализ апатитов в изучении динамики тектонических процессов на примере юго-восточной части Горного Алтая // III Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского. 2013. С. 731-735
8. Буслов М.М., Де Гравэ, Ветров Е.В. Геодинамика формирования мезозойского и кайнозойского горообразования и осадочных бассейнов Азии // Развитие минерально-сырьевой базы Сибири: от В.А. Обручева, М.А. Усова, Н.Н. Урванцева до наших дней. 2013. С. 133-136.
9. Ветров Е.В. Буслов М.М. Эволюция формирования рельефа Юго-Восточного Горного Алтая в кайнозое по трековому датированию апатита // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). 2013. В. 11. с. 53-55.
10. Ветров Е.В. Кайнозойская тектоника и геодинамика формирования структуры Курайско-Чуйской впадины и горного обрамления юго-восточной части Горного Алтая // Материалы 50-й Международной научной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс": Геология. 2012. С. 76-76.



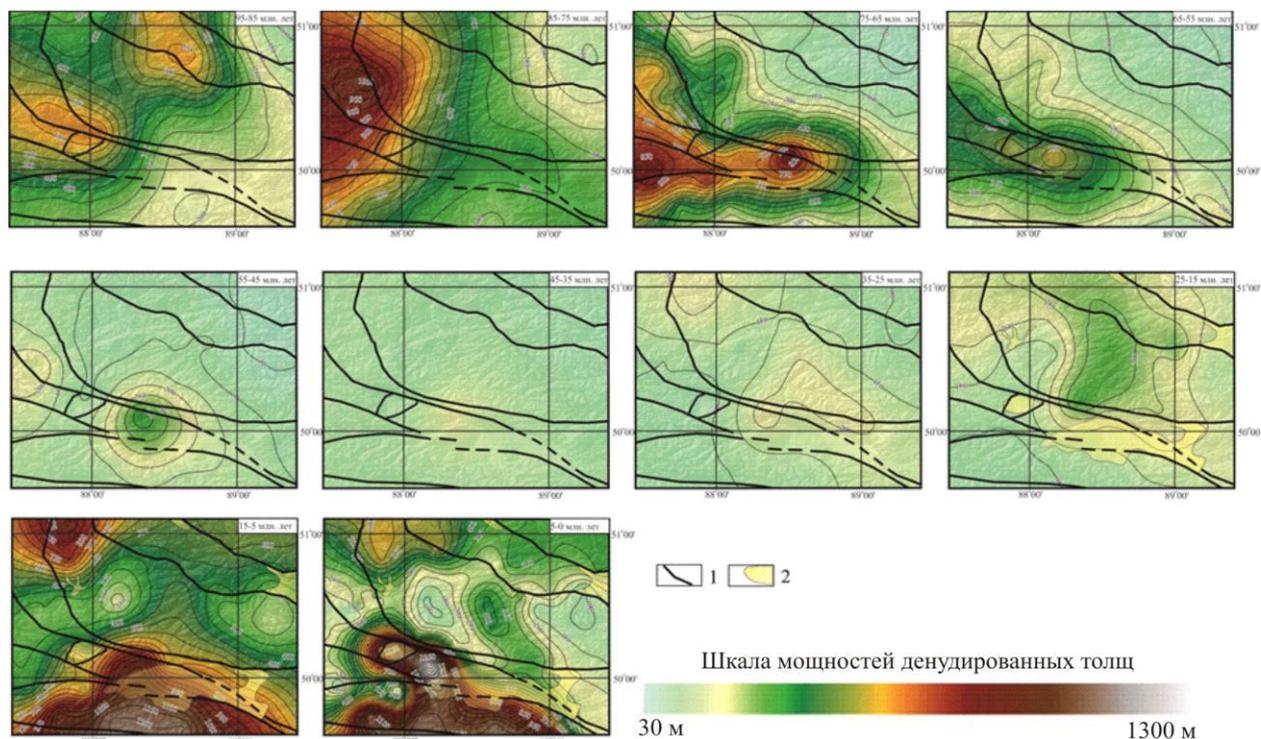
А

Корреляция региональных моделей распределения трековых параметров (трековых возрастов (а) и средних трековых длин (б)) для юго-восточной части Горного Алтая, современная сейсмическая активность: положение афтершоков (в) и эпицентров крупнейших землетрясений (г). 1-линии региональных позднепалеозойских разломов, 2-эпицентры землетрясений с  $M=3$  (а),  $M=5$  (б),  $M=8$  (в); 3- эпицентры афтершоков

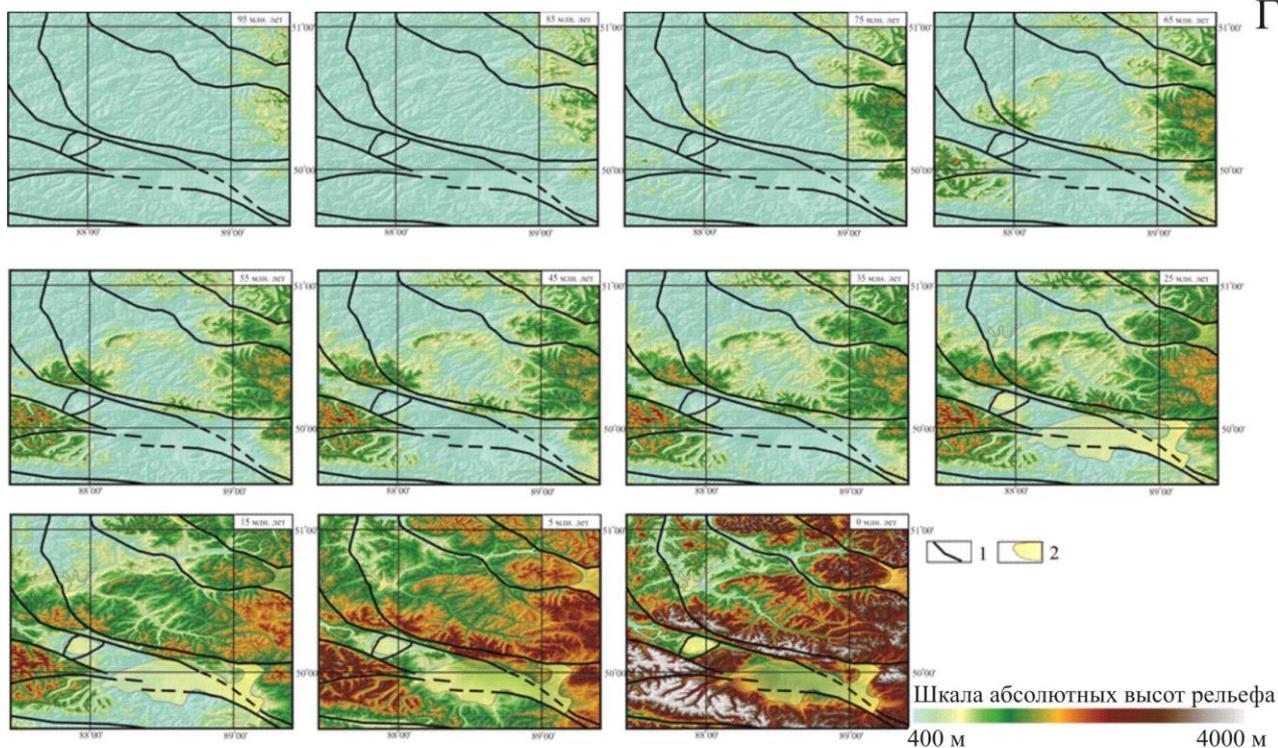


Б

История остывания пород юго-восточной части Горного Алтая за последние 95 млн лет с шаговым интервалом в 10 млн (по [Ветров и др., 2016] с дополнениями автора). лет. 1-линии региональных позднепалеозойских разломов, 2-кайнозойские впадины



Модель региональных денудационных событий за последние 95 млн лет с временным интервалом 10 млн лет (по [Ветров и др., 2016] с дополнениями автора)  
1-линии региональных позднепалеозойских разломов, 2-кайнозойские впадины.



Схемы позднемезозойско - кайнозойского рельефа юго-восточной части Горного Алтая за последние 95 млн лет (по [Ветров и др., 2016] с дополнениями автора)  
1-линии региональных позднепалеозойских разломов, 2-кайнозойские впадины.