

МЕЗОЗОЙСКО-КАЙНОЗОЙСКАЯ ТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА АЛТАЯ, ТЯНЬ-ШАНЯ И СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТРЕКОВОГО ДАТИРОВАНИЯ АПАТИТОВ

М.М. Буслов, Д.А. Кох, И. де Граве*

Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Контога, 3, Россия

** Geochronology Group, Dept. of Mineralogy Petrology, Ghent University, 281/S8, Krijgslaan, B-9000, Cheut, Belgium*

В последнее десятилетие активно развиваются исследования Центральной Азии, связанные с моделированием термальной истории пород методом трекового датирования апатитов (АФТ), позволяющим выявлять периоды тектонической стабилизации (пенепленизации) и активности (горообразования). В настоящее время методом АФТ получено более 100 датировок по образцам из Киргизского Тянь-Шаня и Алтая. В сравнительном анализе с ними представляются новые данные по трековому датированию пород Северного Казахстана. Геологические, геоморфологические и данные апатитового трекового датирования показывают, что внутренняя часть Евразийского континента перенесла значительную позднекайнозойскую реактивацию. Воздействие Индо-Евразийской коллизии на Северный Тянь-Шань, Алтай и Северный Казахстан проявились в последние 11, 5 и 3 млн лет соответственно, что указывает на постепенное проникновение деформаций на дальние расстояния внутрь континента, реактивацию его структуры с ростом горных поднятий. Сделано предположение, что эффект дальнего воздействия позднекайнозойской коллизии Индийского континента с Евразией проявился в реактивации палеозойских разломных зон с деформацией мезозойского осадочного чехла, в том числе и удаленной от зон коллизии Западно-Сибирской плиты, создав при этом благоприятные условия для формирования структурных ловушек для нефти и газа. На фоне вдавливания Индии в Евразию продолжается процесс реактивации северных районов Центральной Азии и южная часть Западно-Сибирской плиты будет вовлекаться в процесс поднятия.

Коллизия, микроконтинент, Евразия, орогенез, пенеплен, трековое датирование, термальная история пород.

MESOZOIC-CENOZOIC TECTONICS AND GEODYNAMICS OF THE ALTAI, TIEN SHAN, AND NORTHERN KAZAKHSTAN, FROM APATITE FISSION-TRACK DATA

M.M. Buslov, D.A. Kokh, and J. De Grave

Apatite fission-track (AFT) thermochronological modeling as diagnostic of stability (surface planation) and activity (mountain building) periods has been lately a broadly used tool in tectonic studies of Central Asia. We discuss more than 100 AFT ages of samples from the Kyrgyz Tien Shan and the Altai and compare them to AFT dates from northern Kazakhstan. Geological, geomorphological, and AFT data indicate intense activity in the Late Cenozoic Eurasian continental interior. The impact from the India-Eurasia collision on the northern Tien Shan, Altai, and northern Kazakhstan regions showed up at 11, 5, and 3 Ma, respectively, as a result of stress propagation inward the continent, with the ensuing reactivation and mountain growth. We hypothesize that the distant effect of the Late Cenozoic India-Eurasia collision was to rejuvenate Paleozoic fault zones and to deform the Mesozoic sedimentary cover north of the collision front as far as the West Siberian Plate. The reactivation facilitated formation of tectonic oil and gas traps. The activity in northern Central Asia under the effect of India indentation into Eurasia appears to continue and may involve with uplift the southern West Siberian Plate.

Collision, microcontinent, orogeny, penplain, fission-track dating, thermal history of rocks, Eurasia

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие активно развиваются исследования Центральной Азии, связанные с моделированием термальной истории пород методом трекового датирования апатитов (АФТ), позволяющей выявлять периоды тектонической стабилизации (пенепленизации) и активности (горообразования). В настоящее время методом АФТ получено более 100 датировок по образцам из Киргизского Тянь-Шаня и Алтая, которые свидетельствуют как о мезозойской, так и о позднекайнозойской внутриконтинентальной реактивации земной коры Центральной Азии [De Grave, Van den Haute, 2002; De Grave et al., 2002, 2004, 2006, 2007; Sobel et al., 2006; Buslov et al., 2007]. В корреляции с геологическими данными сделано предположение [Буслов и др., 2006; Buslov et al., 2006; De Grave et al., 2007], что в мезозое рост внутриконтинентальных орогенов связан с дальним воздействием коллизий Гондванских континентальных блоков (Таримского микроконтинента и Северо-Китайского континента) с активной окраиной Северной Евразии. Аналогом таких структур [Buslov, 2004] является кайнозойский Центрально-Азиатский ороген (рис. 1), возникший в результате коллизии Индийского континента с Евразией [Molnar, Tarronnie, 1975; Добрецов и др., 1995; Dobretsov et al., 1996; Буслов и др., 1999].

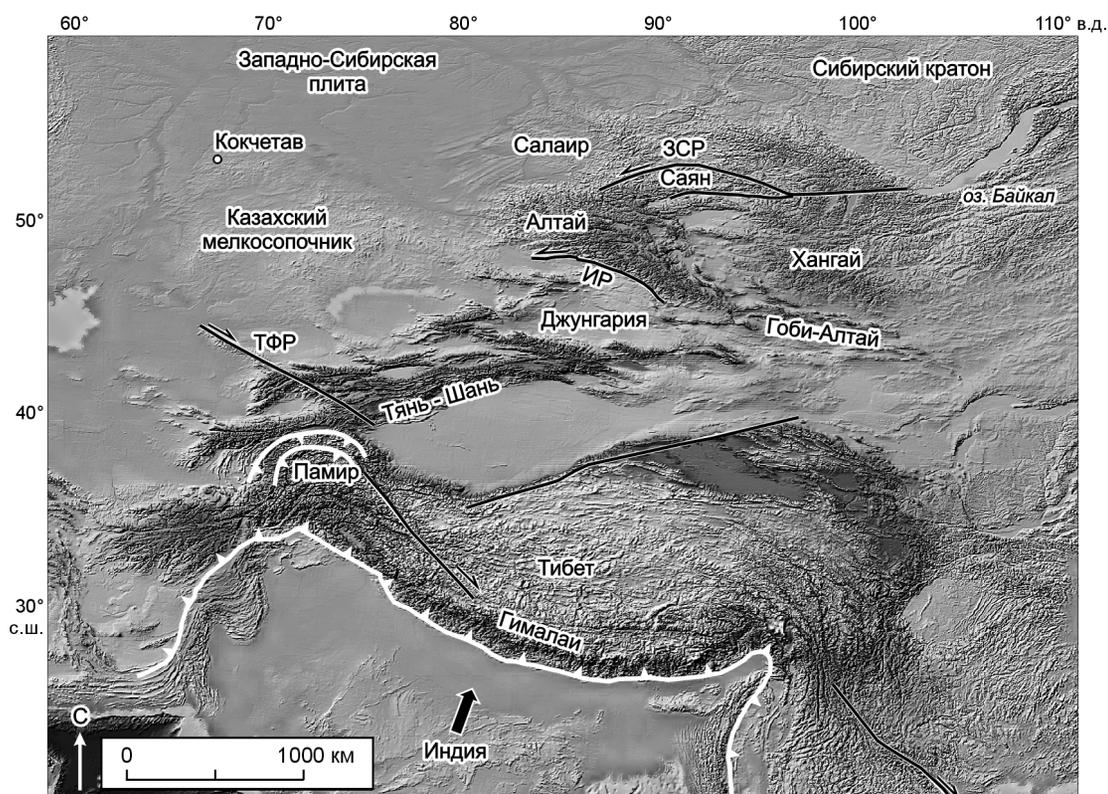


Рис. 1. Топографическая модель, отражающая главные тектонические и структурные элементы Центральной Азии: ИР — Иртышский разлом, ТФР — Таласо-Ферганский разлом, ЗСР — Западно-Саянский разлом.

Северный Казахстан (рис. 2, 3) расположен в переходной зоне от Казахстанского щита в Западно-Сибирскую плиту вдали (более чем 1500—2000 км) от выявленных кайнозойских зон реактиваций. В пределах Казахстанского щита выделяется ряд низкорельефных поднятий [Геология СССР, 1972; Абдулин, 1981]: Улытау-Жездинское, Кызылрайское, Аксоранское, Аксу-Аюпинское, Улутаусское, Чингиз-Тарбагатайское, Кокчетавское и др., которые формируют рельеф, называемый Казахским мелкосопочником.

В Северном Казахстане переходная зона представлена предгорной равниной с выходами на дневную поверхность пород фундамента, формирующих отроги низкорельефного рельефа Кокчетавского поднятия с высотами до 1000 м от уровня моря. Рельеф переходной зоны Северного Казахстана сочленяется с подобным рельефом хр. Тарбагатай, и далее на восток переходит в морфоструктуры Алтая и Западного Саяна. Восточное звено переходной зоны осложнено субмеридиональными морфоструктурами Салаирского кряжа и северными отрогами Кузнецкого Алатау, которые являются остатками мезозойских горных поднятий, слабо реактивированных в кайнозое [Добрецов и др., 1995; Буслов и др., 1999, 2006; Buslov et al., 2006; De Grave et al., 2007].

Формирование и развитие рельефа Казахстанского щита до сих пор остается одной из дискуссионных проблем геоморфологии Центральной Азии. Ее решение имеет большое значение в выяснении вопросов передачи деформаций на дальние расстояния и формирования внутриконтинентальных орогенов от воздействия коллизии крупных континентальных масс, выявлении источников сноса обломочного материала для осадочных бассейнов Азии, построении палеогеографических и палеотектонических реконструкций.

Низкорельефные поднятия Казахстанского щита, согласно существующим мнениям, рассматриваются [Абдулин, 1981] как остаточные формы рельефа от палеозойских орогенов или как результат магматического выдавливания интрузивных тел, расположенных в ядрах перечисленных поднятий. Согласно другой точки зрения [Макаров, 1990, 1996], они возникли в результате неотектонической активизации от воздействия Индо-Евразийской коллизии.

В рельефе Северного Казахстана выделяются (см. рис. 2) верхняя Драгомировская и нижняя Явленская ступени, разделенные Богодуховским уступом высотой до 150 м. Драгомировская ступень (Кокчетавское поднятие) представляет собой цокольную денудационную равнину Казахского щита, состоящую из серии гряд с отметками до 350—450 м над уровнем моря. Среди них расположены низкие горы с

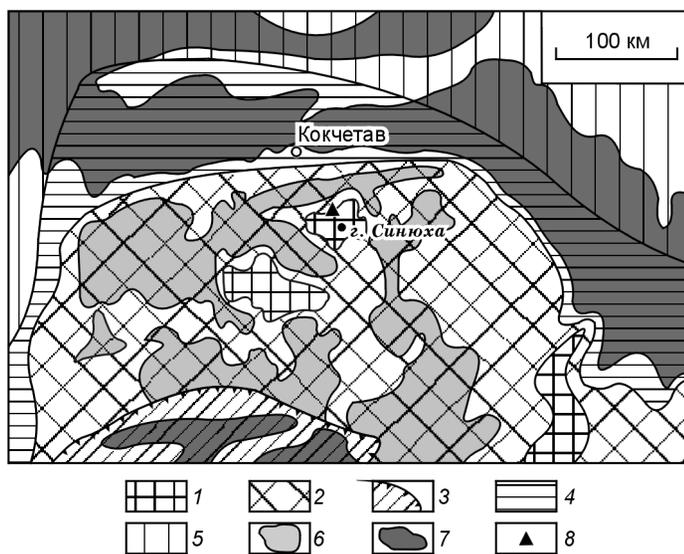


Рис. 2. Морфологическая схема Кокчетавского поднятия Северного Казахстана с районами распространения кор выветривания [Геология..., 1987].

1—4 — морфологические структуры Казахстанского щита: 1 — цокольная денудационная равнина Драгомировской ступени, 2 — низкие горы и высокий мелкопочник, 3 — впадина, 4 — склон (Явлинская ступень); 5 — аккумулятивная равнина Западно-Сибирской плиты; 6, 7 — коры выветривания: 6 — позднемеловые и палеогеновые, 7 — раннемеловые; 8 — место отбора образца на трековое датирование.

от Кокчетавского поднятия расположены, соответственно, склон щита (Явлинская ступень) и обширная равнина Западно-Сибирской плиты с отметками высот до 250 м над уровнем моря.

Докембрийско-палеозойские породы Драгомировской ступени (цокольной денудационной равнины) перекрыты палеогеновыми осадками мощностью 20—150 м, которые полого погружаются на север. Явлинская ступень (склон щита) перекрыта юрскими, меловыми и палеогеновыми осадками мощностью до 350 м. К северу, в пределах южной части Западно-Сибирской плиты, палеозойский фундамент ступенчато погружается на глубины до 800 м относительно поверхности [Геология..., 1987].

В статье представляется и обсуждается результат трекового датирования пород из Кокчетавского поднятия Северного Казахстана (см. рис. 2), полученный впервые на аппаратурной базе Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск). Были изучены докембрийские гранито-гнейсы из Кокчетавского метаморфического комплекса, расположенного к северу от оз. Бол. Чебацье (обр. Kokch-2, высота 354 м, координаты: 53°09'33.6" с.ш., 70°15'51.4" в.д.).

Обсуждение результата производится в сопоставлении с кратким обобщением многолетнего исследования методом АФТ мезозойско-кайнозойской тектоники и геодинамики Алтая и Киргизского Тянь-Шаня [De Grave, Van den Haute, 2002; De Grave et al., 2004, 2006, 2007; Sobel et al., 2006; Buslov et al., 2007].

МЕТОДИКА ТРЕКОВОГО ДАТИРОВАНИЯ И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ВЫЯВЛЕНИИ ВОЗРАСТА И СКОРОСТИ ДЕНУДАЦИИ ОРОГЕННЫХ СИСТЕМ

Для трекового датирования могут быть использованы различные минералы (сфен, апатит, циркон и др.). Апатит является акцессорным минералом большого количества пород, что и обуславливает его широкое использование в выявлении термальной истории пород [Green et al., 1979]. В англоязычной литературе метод получил название «fission-track dating» — датирование по трекам осколков деления урана. Для краткости используется термин «трековое датирование», а в случае использования апатита — «апатитовое трековое датирование» или «apatite fission-track» (АФТ). Нестабильные изотопы ^{238}U в ходе кристаллизации породы заключаются в кристаллическую решетку минералов. Со временем они распадаются на две одинаково заряженные частицы. Одинаковый заряд частиц отталкивает их друг от друга. В зависимости от энергий частиц, на которые распался нестабильный атом и строения кристаллической решетки, в которой он находился, разлетающиеся в противоположные стороны частицы деформируют решетку кристалла. Эта деформация называется треком распада. При температуре ниже 120 °С треки сохраняются, а если происходит повышение температуры, то они быстро отжигаются и исчезают. При нормальном геотермическом градиенте, равном 25—30 °С/км, область сохранения треков начинается с глубин 3.5—4.5 км. Как правило, одинаковые нестабильные изотопы, находящиеся в одном минерале, распадаясь, производят треки одинаковой длины. Для апатита она составляет 16 мкм. Кристаллы апатита изучаются в приполированных шашках. Травление в 2.5 %-м растворе HNO_3 (60 с при комнатной температуре) делает треки видимыми при большом увеличении на оптическом микроскопе. После травления производится подсчет плотности треков на единицу площади. Эти данные дают представление о плотности распавшихся треков после спонтанного распада ^{238}U (ρ_s). В силу большого времени полураспада ^{238}U (8.2×10^{15} млн лет) не все ядра нестабильного изотопа распадаются за время нахождения апатита в породе. После подсчетов около 1000 треков, к шашке прикрепляется внешний детектор — пластинки искусственного мусковита, не содержащего U. Во время облучения в образцах происходит вынужденный

распад оставшегося ^{238}U . Вновь образованные треки деформируют структуру как апатита, так и мусковита. Далее 40 % HF кислотой травится (40 мин при комнатной температуре) только внешний детектор, и на нем подсчитывают плотность треков. Получается цифра, отражающая плотность индуцированных треков (ρ_i), распавшихся в реакторе под действием нейтронного потока. На основе этих данных определяется «модельный» возраст породы [Wagner, Van den Haute, 1992] с помощью уравнения.

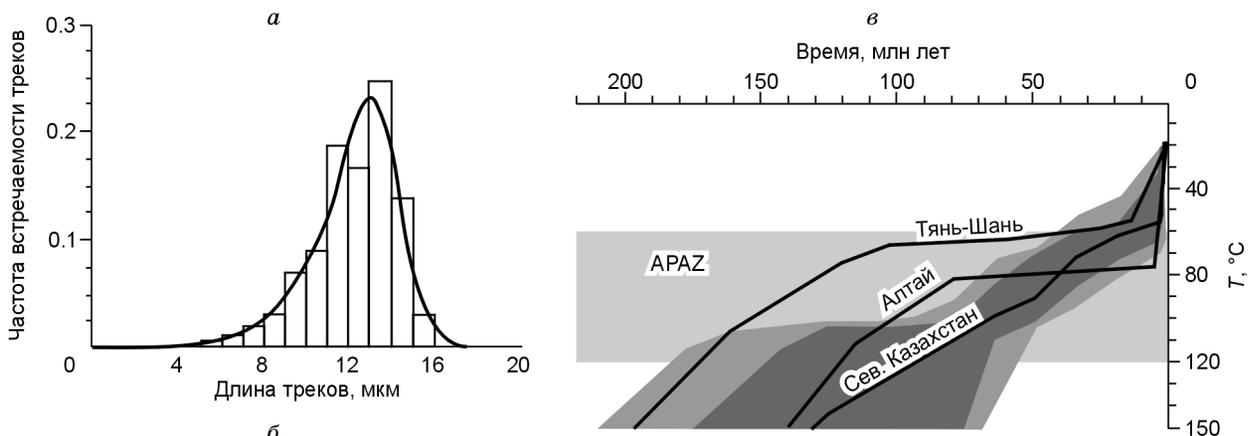
$$t_U = \lambda_\alpha^{-1} \ln [\lambda_\alpha (\rho_s / \rho_i)_U G \zeta (\rho_d)_U + 1],$$

где λ_α — константа распада ^{238}U ($^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 1/137.88$), G — геометрический фактор, ζ — калибровочный коэффициент, получаемый с помощью минералов-индикаторов, индивидуален для каждого исследователя, ρ_d — плотность спонтанных треков в стеклянном дозиметре, облучаемом вместе с образцом, ρ_s — плотность спонтанных треков в минерале, ρ_i — плотность индуцированных треков в минерале.

Главным фактором в разрушении (отжиге) треков спонтанного деления является температура. Чем больше времени находится образец под температурным воздействием, тем при меньших ее значениях происходит значительный отжиг треков. Температурный интервал, в котором происходит отжиг треков, называют зоной частичного отжига апатитов (apatite partially annealing zone — APAZ). Термальная стабильность треков варьирует от минерала к минералу и увеличивается в следующем порядке: апатит—циркон—сфен. Для апатита она составляет 60—110 °C (± 10 °C) [Lazlett et al., 1987]. В процессе отжига уменьшается не только плотность треков, но и уменьшаются их длины. Изменение температур, особенно при эрозии, связанной с подъемом территории, происходит медленно, поэтому отжиг треков является градиентным процессом, что позволяет использовать его для выявления термальной истории пород с построением графиков остывания изучаемой породы (см. рис. 3).

Формирование рельефа зависит от многих факторов и является результатом интегрального воздействия эндогенных (тектоники и магматизма) и экзогенных процессов (эрозии, изменения климата). Так как трековый метод дает количественную информацию, то он может быть использован для оценок возраста формирования поднятия и стабилизации тех или иных сегментов земной коры, скоростей и возраста эрозии. Эта информация в корреляции с геологическими данными позволяет сделать выводы о возрасте и интенсивности тектонической активности изучаемых территорий.

Термальная история пород моделируется компьютерной программой AFTSolve [Ketcham et al., 2000] с построением графиков (см. рис. 3, в), отображающих тренд изменения температурного режима породы во времени (t, T). Зная нормальный градиент изменения температур с глубиной (25—30°/км), то по полученному t, T -тренду можно подсчитать, за какое время и какой мощности слой пород был денудирован. Пологое поведение линии обычно интерпретируется как период тектонической стабилизации в регионе с возможным формированием пенеплена. Значения наклонности линии указывают на скорость и интенсивность денудации, что может рассматриваться как степень тектонической активизации



Модельная длина треков	12.3 ± 2.1 мкм
Измеренная длина треков	12.2 ± 1.8 мкм
Модельный возраст	56.4 млн лет
Подсчитанный возраст	56.4 ± 3.9 млн лет
Самый древний трек	73.2 млн лет

Рис. 3. Моделирование термальной истории обр. Kokch-2.

а — примерная история образования и развития во времени, б — распределение длин треков, в — низкотемпературная история образца, смоделированная программой AFTSolve [Ketcham et al., 2000].

Полоса температурный интервал от 60 до 120 °C, является зоной частичного отжига треков. Серое поле отражает нормальное, темно-серое поле — хорошее и линия — наилучшее приближение термальной истории обр. Kokch-2 из Северного Казахстана к исходным данным.

в регионе, выраженной в росте горных систем и поднятий. Любая интерпретация результатов трекового датирования обязательно коррелируется с геологическими и геоморфологическими данными.

КРАТКОЕ ОБОБЩЕНИЕ ИСТОРИИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕЗОЗОЙСКО-КАЙНОЗОЙСКОГО РЕЛЬЕФА И ТЕКТониКИ ТЯНЬ-ШАНЯ И АЛТАЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ТРЕКОВОГО ДАТИРОВАНИЯ АПАТИТОВ

На рис. 3 приведены обобщенные результаты термальной истории пород, выраженной на графиках остывания для Тянь-Шаня и Алтая [De Grave, Van den Haute, 2002; De Grave et al., 2004, 2006, 2007; Sobel et al., 2006]. На Тянь-Шане АФТ пики горообразования проявились в периоды ~200—130 и в последние 11 млн лет, на Алтае в периоды ~140—80 и в последние 5 млн лет. Юрская реактивация Северного Тянь-Шаня, возможно, связана с заключительной фазой коллизии континентального блока Тарима с Евразией, завершающей субдукцию литосферы Палеотетиса, а меловая реактивация Алтая связана, как предполагается [Буслов и др., 2006; Buslov et al., 2006, 2007; De Grave et al., 2007], с дальним эффектом воздействия коллизии Северо-Китайского континента с Евразией, завершающей закрытие Монголо-Охотского океана [Зоненшайн и др., 1990; Zorin, 1999].

Субвертикальные мезозойские t , T -тренды охлаждения (150—70 °С) пород Тянь-Шаня и Алтая свидетельствуют по меньшей мере о 2—3 км денудации горных массивов соответственно в юре и мелу.

Почти горизонтальные t , T -тренды между температурами нижней границы и верхним пределом АФТ устойчивости (70—50 °С) для мела—миоцена на Тянь-Шане и позднего мела—миоцена на Алтае отражают периоды продолжительной стабильности. В течение этих периодов территории Тянь-Шаня и Алтая находились в тектоническом покое и мезозойские орогены подвергались выравниванию. Остатки пенепленов сохранились во многих частях горных систем. Их поверхность сильно деформирована в результате кайнозойской (с 35 млн лет по ныне) тектонической активности, связанной с Индо-Евразийской коллизией [Molnar, Tapponnier, 1975; Dobretsov et al., 1996; Aitchison et al., 2007]. Коллизия вызвала проявление колоссальных перемещений блоков земной коры по сдвигам на огромной территории Центральной Азии. Деформации проникли на многие тысячи километров внутрь Евразийского континента и привели к росту гор и поднятий, которые возникли на последней стадии коллизии. В случае Индо-Евразийской коллизии, начавшейся 35 млн лет назад, эффект ее дальнего воздействия на орогенез в Центральной Азии проявился намного позже, почти через 30 млн лет [Dobretsov et al., 1996; Buslov, 2004; De Grave et al., 2002, 2004, 2006, 2007]. Начало возраста реактивации как результата продолжительного углубления Индии в Евразию омолаживается по направлению на север: ~11—7 млн лет на Северном Тянь-Шане и ~5 млн лет на Алтае. Максимальный рост горных систем Центральной Азии произошел за последние 3 млн лет, т. е. примерно через 30 млн лет после начала Индо-Евразийской коллизии. Вероятно, что это событие связано с тем, что деформации дошли до мощного Сибирского кратона около 5 млн лет назад и в зоне взаимодействия активного Индийского индентора и пассивного упора со стороны Сибирского кратона наступил период максимального торшения и роста горных масс. Современные высокие горы выросли на огромной территории от Гималайской до Байкальской горных систем (см. рис. 1). Данные ФТА-датирования подтверждают гипотезу о том, что продолжающаяся до сих пор конвергенция Индийского и Евразийского континентов частично реализована в постепенном распространении стресса на север через внутриконтинентальные части Центральной Азии по унаследованной структурной сети разломов [Dobretsov et al., 1996; Molnar, Tapponnier, 1975; Макаров, 1990, 1996; Уфимцев, 1990] с передачей деформации на дальние расстояния по «принципу домино» через жесткие участки литосферы [Dobretsov et al., 1996; Buslov, 2004], которыми являются континентальные блоки Гондваны, включенные в палеозойские складчатые зоны.

МЕЗОЗОЙСКО-КАЙНОЗОЙСКАЯ ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА ПО ДАННЫМ ТРЕКОВОГО ДАТИРОВАНИЯ АПАТИТОВ

На рис. 3 приведен график плотности распределения длин треков и смоделирована программой AFTSolve [Ketcham et al., 2000] термальная история обр. Kokch-2. В термальной истории можно выделить четыре этапа. Первый этап от 130 до 50 млн лет (мел—палеоцен) характеризуется средними углами наклона линии t , T -тренда и отражает постепенное охлаждение породы от 150 до 90 °С. На втором этапе от 50—35 млн лет (эоцен) угол наклона линии t , T -тренда становится круче, что указывает на более быстрое охлаждение образца от 90 до 70 °С. Для третьего этапа 35—3 млн лет (олигоцен—ранний плиоцен) отмечается средний угол наклона линии t , T -тренда, что отражает постепенное охлаждение породы с 70 до 55 °С. Четвертый этап, последние 3 млн лет (средний плиоцен—голоцен), проявлен субвертикальной линией t , T -тренда и свидетельствует об очень быстром охлаждении пород от 55 до 20 °С. При изменении нормального градиента температур 25—30 °/км получается, что породы кокчетавского метаморфического комплекса на первом этапе за 80 млн лет охладились на 60 °С, что соответствует денудации примерно 1600-метровой толщи пород. На втором этапе породы охладились на 20 °С и за

15 млн лет произошла денудация около 550-метровой толщи пород, на третьем этапе породы охладились на 15 °С и за 32 млн лет произошла денудация около 400 м толщи пород. Наиболее быстро охлаждение образца на 35 °С произошло за последние 3 млн лет, что предполагает денудацию около 900-метровой толщи пород. Средняя скорость охлаждения (денудации) пород для первого этапа составляет около 20, второго этапа — около 40, третьего этапа — около 12, а четвертого — около 300 м/млн лет.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Полученные результаты трекового датирования апатитов по Северному Казахстану (см. рис. 3) свидетельствуют о том, что территория реагировала на дальнейшее воздействие коллизии Северо-Китайского и Индийского континентов с Евразией. В мелу—палеоцене (130—50 млн лет) коллизия Северо-Китайского континента сопровождалась медленным поднятием с денудацией 1600-метровой толщи пород. Вероятно, что начальная стадия конвергенции Индии с Евразией проявилась на Северном Казахстане в ускорении воздымания территории и усилении скорости денудации до 40 м/млн лет в период 50—35 млн лет. В результате этого события был сформирован низкорельефный рельеф, в основе которого находились остатки мел-палеоценовых поднятий. Начиная с 35 млн лет происходило медленное разрушение этого рельефа, который был вовлечен в последующее поднятие около 3 млн лет назад. Учитывая, что в южной части Казахстанского щита интенсивная активизация произошла около 11 млн лет назад с ростом Тянь-Шаньской горной системы, то следует предполагать, что формирование современного рельефа Казахстанского щита в целом произошло за последние 11 млн лет под воздействием Индо-Евразийской коллизии. В этот период на территории к северу от Тянь-Шаня произошло формирование рельефа современного Казахстанского мелкосопочника, который отражает этап максимального горообразования и тектонической активизации на территории Центральной Азии.

Термальная история пород Тянь-Шаня и Алтая, расположенных в зоне активного взаимодействия уступов Индии и Сибирского кратона, отличается от термальной истории пород Северного Казахстана по наличию четко выраженных пологих поведений t , T -трендов и скоростям денудации. Пологие t , T -тренды трактуются как периоды выравнивания рельефа и совпадают с возрастом тектонического покоя и формированием кор выветривания. В мелу—палеоцене и олигоцене—раннем голоцене скорость денудации оценивается соответственно в 20 и 12 м/млн лет, что в 2—3 раза меньше, чем скорость денудации на Тянь-Шане и Алтае в период активного роста горных систем. В олигоцене—раннем плиоцене скорости денудации в Северном Казахстане, Тянь-Шане и Алтае были приблизительно одинаковы. Последующая смена температурного режима за последние 3 млн лет связана с быстрым поднятием и денудацией пород. Скорость денудации достигала 300 м/млн лет, что соизмеримо со скоростью денудации на Тянь-Шане и Алтае в этот же период времени. Четко проявленный пик t , T -тренда охлаждения гранито-гнейсов Кокчетавского метаморфического комплекса в последние 3 млн лет совпадает с максимальным этапом горообразования на Тянь-Шане и Алтае и свидетельствует о том, что сжатие от Индо-Евразийской коллизии также проявилось и на Северном Казахстане. Вероятно, что в целом рельеф Казахстанского мелкосопочника является, с одной стороны, остаточным от разрушенного мезозойского орогена, с другой, — интенсивно реактивированным за последние 3 млн лет, что обусловлено сжатием со стороны Индийского континента.

Одной из особенностей геологии Казахстанского щита является широкое распространение разновозрастных кор химического выветривания. В Северном Казахстане наиболее распространенными являются нижнемеловая кора выветривания, развитая на Явлинской ступени северного склона щита, и верхнемеловая—палеогеновая, характерная для Драгомировской ступени и внутренних частей щита [Геология..., 1987]. Нижнемеловая кора выветривания сохранилась от размыва в основании мезозойских толщ во впадинах и на склоне Казахстанского щита. Верхнемеловая и палеогеновая коры выветривания формируются преимущественно вдоль разломных зон с повышенной трещиноватостью и дроблением, проникая до глубин 250 м и более. На Драгомировской ступени щита в северной части Орлиногорского гранитного массива кора выветривания перекрыта песчано-глинистыми отложениями обуховской свиты верхнего эоцена—нижнего олигоцена [Геология..., 1987].

Особенности формирования кор выветривания Северного Казахстана хорошо согласуются с интенсивностью рельефообразующих процессов, оцененных по данным трекового датирования. В результате меловой активизации на Северном Казахстане заметно повысилась континентальная денудация, которая происходила одновременно с поднятием и выравниванием рельефа на Драгомировской ступени. Реликты верхнемелового—палеоценового пенеплена здесь сохранились в форме слабоволнистой цокольной денудационной равнины с высотой в 350—450 м над уровнем моря, в пределах которой расположены низкорельефные возвышенности с высотами до 1000 м (см. рис. 2). Так как по результатам трекового датирования в мелу—палеоцене было подвержено денудации около 1600 м пород, то следует предполагать, что рельеф Северного Казахстана в это время был среднегорным и расчленен впадинами. Водоразделы представляли собой плоские равнины, на которых за длительный период времени (мел—палеоген) формировались и

размывались коры выветривания, вероятно, большой суммарной мощности. Остатки кор выветривания в настоящее время наблюдаются преимущественно в разломных зонах, которые формировались одновременно с ними и свидетельствуют о мезозойско-палеогеновой активизации в регионе. В эоцене, по данным трекового датирования, Северный Казахстан находился в восходящем движении, которое привело к размыву древних кор выветривания. С поднятием территории связана закладка и дальнейшее развитие в олигоцене погребенных долин рек, таких как Иманбурлук, Бабыкбурлук, Чаглинка, Жабай, Кылшакты, а также возникновение целого ряда бессточных впадин и долин.

В олигоцене—раннем плиоцене в период относительной стабилизации региона происходило накопление [Геология..., 1972; Геология..., 1987] песчано-глинистых осадков и зеленовато-серых и краснобурых глин в многочисленных впадинах, расположенных как в пределах Северо-Казахстанского мелкосопочника, так и в южной части Западно-Сибирской равнины. В области распространения денудационных равнин и мелкосопочного рельефа интенсивно проявлялись делювиально-пролювиальные процессы, протекала аккумуляция и формирование обширных делювиально-пролювиальных равнин.

Аккумуляция обломочного материала, сносимого с водоразделов в это время, происходила главным образом на поверхности обширной аккумулятивной равнины Западно-Сибирской плиты. По данным бурения [Волкова и др., 2002], в Омско-Кулундинском районе (Ишимском и Барабинском подрайонах) южной части Западно-Сибирской плиты формировались олигоцен-раннеплейстоценовые континентальные образования (речные, озерные и озерно-болотные отложения), которые залегают на мел-эоценовых морских осадках. Мощность континентальных осадков увеличивается к северу от первых десятков метров в пределах Казахстанского щита до нескольких сотен метров в Северной Барабе. В Северном Казахстане, в пределах плитного комплекса скважинами вскрыты разрезы среднего палеогена—неогена мощностью до 130 м, которые в Северной Барабе достигают 300 м.

Средний плейстоцен—голоцен ознаменовался интенсивным поднятием территории Северного Казахстана [Геология..., 1972; Геология..., 1987]. Данные трекового датирования позволяют оценить скорость денудации растущих поднятий на драгомировской ступени в 300 м/млн лет. В результате произошло образование низкогорий и дальнейшее формирование мелкосопочного рельефа. Поднятию отдельных локальных участков, сложенных преимущественно гранитами, сопутствовало локальное опускание прилегающих территорий с образованием в них крупных озер, таких как Имантау, Шелкар, Саумальколь, Зерендинское, Большое и Малое Чебачье. В это же время начинают закладываться современные долины рек: Иманбурлук, Бабыкбурлук, Сары-Узек, Чаглинка и др. Процессы современного образования рельефа ярко выражены в образовании пойменных террас, в оживленном поднятии региона в целом и постепенном врезании рек в четвертичные и более древние отложения, выполняющие долины.

Вызванный Индо-Евразийской коллизией рост горных систем Памира, Гималаев и Тибета (см. рис. 1), превышающих 4000 м над уровнем моря, существенно изменил атмосферную циркуляцию, и на территории Северного Казахстана в конце неогена произошла смена гумидного тропического и субтропического климата на аридный. Горные системы преградили путь влажным муссонам со стороны Индийского и Тихого океанов и северная часть Азии попала под воздействие воздушных потоков Арктики и Атлантического океана [Синицин, 1949]. Скорость денудации в Северном Казахстане за последние 3 млн лет составляет около 300 м/млн лет. Близкие скорости денудации существовали на высокогорном Тянь-Шане и Алтае, но они здесь сопровождалась и сопровождаются формированием моласс за счет выноса грубообломочного материала горными реками. На Северном Казахстане и близлежащих регионах нет признаков грубообломочного осадконакопления, что может свидетельствовать о разрушении пород и за счет других факторов. Низкогорный рельеф в Северном Казахстане слагают преимущественно гранитные массивы, а большинство возвышенностей сложены кварцитами. Низкие горы, сложенные гранитами, окружены впадинами, заполненными озерами. Граниты расположены преимущественно среди слюдястых гранитоидов, из которых и был отобран образец, опробованный на трековое датирование. Образец расположен в нескольких километрах на север и почти на 500 м ниже самой высокой вершины Кокчетавского поднятия горы Синюха с высотой 947 м над уровнем моря. Можно предполагать, что на фоне общего сжатия произошло «всплывание» монолитных гранитных массивов и быстрое разрушение слюдосодержащих пород. Одним из дополнительных механизмов разрушения, кроме размыва растущих поднятий, могло быть выдувание частиц, седиментация которых сформировала лессы на обширной территории Азии, возраст самых древних из которых составляет 2.5 млн лет [Додонов, 2002].

Таким образом, геологические, геоморфологические и АФТ-данные показывают, что внутренняя часть Евразийского континента перенесла значительную мезозойскую и позднекайнозойскую реактивизации. Закрытие Монголо-Охотского океана способствовало стыковке Северо-Китайского континента с Евразией, что привело к образованию крупномасштабного юрско-мелового субдукционно-аккреционного пояса в Забайкалье в зоне столкновения и мелового коллизионного внутриконтинентального орогена в Центральной Азии [Buslov et al., 2006; De Grave et al., 2007]. Денудация орогена привела к образованию осадков, которые были переотложены в прилегающих крупных и долгоживущих бассейнах, таких как Джунгарский, Таримский, Западно-Сибирский и в новообразованных и развившихся межгорных впади-

нах. Воздействие Индо-Евразийской коллизии, проявленное в росте горных поднятий, на Северном Тянь-Шане началось около 11 млн лет назад, в Алтае-Саянской области — 5 млн лет назад, в Северном Казахстане — 3 млн лет назад, что указывает на постепенное проникновение деформаций на дальние расстояния внутрь континента. Следует предполагать, что эффект дальнего воздействия позднемезозойской коллизии Северо-Китайского континента с Евразией и кайнозойской коллизии Индийского континента с Евразией сопровождался реактивацией палеозойских разломных зон с деформацией мезозойского осадочного этажа. В том числе они могли проявиться и в удаленной от зоны коллизии Западно-Сибирской плите, создав при этом благоприятные условия для формирования структурных ловушек для нефти и газа в ее мезозойском чехле. По аналогии с механизмом формирования поднятий в Северном Казахстане с участием гранитных массивов, наиболее вероятно, что ловушки могли формироваться в мезозойском чехле также над гранитными массивами.

Территория Казахского мелкосопочника, интенсивно воздымающаяся за последние 3 млн лет, возможно, подвергалась ветровой эрозии и поставляла с помощью пыльных бурь материал для формирования лессов Центральной Азии. Следует предполагать, что на фоне вдавливания Индии в Евразию процесс реактивации северных районов Центральной Азии продолжается и южная часть Западно-Сибирской плиты будет вовлекаться в поднятия.

Авторы благодарят В.Г. Трифонова и Н.А. Берзина за ценные замечания и плодотворное обсуждение материалов статьи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 07-05- 00852) и интеграционного проекта СО РАН № 7.10.3, а также Фонда научных исследований — Фландерс (Бельгия).

ЛИТЕРАТУРА

- Абдулин А.А.** Геология Казахстана. Алма-Ата, Наука, 1981, 312 с.
- Буслов М.М., Зыкин В.А., Новиков И.С.** Структурные и геодинамические особенности формирования Чуйской межгорной впадины Горного Алтая в кайнозое // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (12), с. 1720—1736.
- Буслов М.М., Де Граве И., Кох Д.А., Солобова Е.В.** Мезозойско-кайнозойские внутриконтинентальные деформации в Центральной Азии как результат дальнего воздействия коллизий блоков Гондваны с Евразией // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Иркутск, ИЗК СО РАН, 2006, т. 1, с. 48—50.
- Волкова В.С., Архипов С.А., Бабушкин А.Е., Кулькова И.А., Гуськов С.А., Кузьмина О.Б., Левчук Л.К., Михайлова И.В., Сухорукова С.С.** Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кайнозой Западной Сибири. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2002, 246 с.
- Геология СССР, Т. XX.** Центральный Казахстан. Геологическое описание / Под ред. Ш.Е.Есенова, Г.Ф. Ляпичева, Е.А. Шлыгина, А.В. Авдеева. М., Недра, 1972, 532 с.
- Геология Северного Казахстана: стратиграфия** / Под ред. А.А. Абдулина, М.А.Абдулкабирова, М.А. Касымова. Алма-Ата, Наука, 1987, 224 с.
- Добрецов Н.Л., Берзин Н.А., Буслов М.М., Ермиков В.Д.** Общие проблемы эволюции Алтайского региона и взаимоотношения между строением фундамента и развитием неотектонической структуры // Геология и геофизика, 1995 (10), с. 5—19.
- Додонов А.Е.** Четвертичный период Средней Азии // Стратиграфия, корреляция, палеогеография. М., ГЕОС, 2002, 250 с.
- Зоненшайн Л. П., Кузьмин М. И., Натапов Л. М.** Тектоника литосферных плит территории СССР. М., Недра, 1990, т. 2, 334 с.
- Макаров В.И.** Структура горных сооружений Альпийско-Центральноазиатского пояса новейшего горообразования: опыт сравнительного анализа // Геодинамика внутриконтинентальных горных областей. Новосибирск, Наука, 1990, с. 91—96.
- Макаров В.И.** О региональных особенностях новейшей геодинамики платформенных территорий в связи с оценкой их тектонической активности // Недра Поволжья и Прикаспия, 1996, вып. 13, с. 53—60.
- Синицин В.М.** Геотектонический фактор в изменении климата Центральной Азии // Бюл. МОИП. Отделение геологии. 1949, т. 24, вып. 5, с. 3—12.
- Уфимцев Г.Ф.** Пояса возрожденных гор // Геоморфология. 1990, № 1, с. 20—32.
- Aitchison, J.C., Ali, J.R., Davis, A.M.** When and where did India and Asia collide? // J., Geophys. Res, 2007, v. 112, B05423, doi: 10.1029/2006JB004706.
- Buslov M.M.** Cenozoic tectonics of Central Asia: basement control // Himalayan J. Sci. 2004, v. 21, № 41, p. 104—105.

Buslov M., De Grave J., Davies C., Allen M., Kokh D., Soloboeva E. Late Jurassic-Early Cretaceous tectonics and paleogeography of northern Central Asia: a Himalayan type orogeny // *J. Asian Earth Sci.* 2006, v. 26 (2), c. 128.

Buslov M.M., De Grave J., Bataleva E. A.V., Batalev V.Yu. Cenozoic tectonics and geodynamics in the Tian Shan: synthesis of geology and geophysical data // *J. Asian Earth Sci.* 2007, v. 29, p. 205—214.

De Grave J., Van den Haute P. Denudation and cooling of the Lake Teletskoye Region in the Altai Mountains (South Siberia) as revealed by apatite fission-track thermochronology // *Tectonophysics*, 2002, t. 349, p. 145—159.

De Grave J., Buslov M.M., Van den Haute P. Intercontinental deformation in Central Asia: distant effects of India —Eurasia convergence revealed by apatite fission-track thermochronology // *Himalayan J. Sci.* 2004, v. 21, № 41, p. 121—122.

De Grave J., Buslov M., Van den Haute P., Metcalf J., Batalev V. From Palaeozoic Eurasian assembly to ongoing Indian indentation: multi-chronometry of the northern Kyrgyz Tien Shan batholith // *J. Asian Earth Sci.* 2006, v. 26 (2), c. 133.

De Grave J., Buslov V.V., and Van den Haute P. Distant effects of India—Eurasia convergence and Mesozoic intracontinental deformation in Central Asia: constraints from apatite fission-track thermochronology // *J. Asian Earth Sci.* 2007, v. 29, p. 194—213.

Dobretsov N.L., Buslov M.M., Delvaux D., Berzin N.A., Ermikov V.D. Meso- and Cenozoic tectonics of the Central Asian mountain belt: effects of lithospheric plate interaction and mantle plume // *Intern. Geol. Rev.*, 1996, v. 38, p. 430—466.

Green P.F., Duddy I.R., Laslett G.M., Hegarty K.A., Gleadow A.J.W., Lovering J.F. Thermal annealing of fission tracks in apatite: quantitative modeling techniques and extension to geological timescales // *Chem. Geol.*, 1979, p. 155—182.

Ketcham R.A., Donelick R.A., Donelick M.B. AFTSolve: a program for multikinetic modeling of apatite fission-track data // *Geol. Mater. Res.*, 2000, v.2, p. 1—32.

Laslett G.M., Green P.F., Duddy I.R., Gleadow A.J.W. Thermal annealing of fission tracks in apatite: a quantitative analysis // *Chem. Geol.*, 1987, v. 65, p. 1—13.

Molnar, P., Tapponnier, P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, 1975, v. 189, p. 419—426.

Sobel E.R., Osnik M., Burbank D., Mikolaichuk A. Exhumation of basement-cored uplifts: example of the Kyrgyz range quantified with fission track thermochronology// *Tectonics*, 2006, v. 25, TS 2008, p. 1—17.

Wagner G., Van den Haute P. Fission track dating. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht., 1992, p. 285.

Zorin Yu.A. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia//*Tectonophysics*, 1999, v. 306, p. 33—55.

*Рекомендована к печати 31 января 2008 г.
Н.А. Берзиньм*

*Поступила в редакцию 5 марта 2007 г.,
после доработки — 25 декабря 2007 г.*