

Программа № 6 фундаментальных исследований

Отделения наук о Земле РАН

«Динамика континентальной литосферы: геолого-геофизические модели»

Научные руководители акад. А.О. Глико и акад. Ю.Г. Леонов

Проект: Эволюция литосферы Альпийско-Гималайского континентального орогенического пояса в позднем кайнозое (олигоцен–квартер) и роль верхнемантийных процессов в её преобразовании. Научный руководитель В.Г. Трифонов

Отчёт о работах 2013 г.

Согласно утверждённой заявке на проведение исследований 2013 г. по указанному проекту, его цель и задачи состояли в следующем. Цель – обобщить данные об истории новейшего (олигоцен–квартер) горообразования в центральной части Альпийско-Гималайского орогенического пояса (от Альп до Гималаев) и выявить тенденции его развития; по геолого-геоморфологическим, структурным и вещественным индикаторам оценить преобразования литосферы пояса, роль неоднородности проявления геодинамических процессов в литосфере и воздействия подлитосферных верхнемантийных потоков в этих преобразованиях. Конкретные задачи исследований 2013 г. разделялись на две группы. Первая группа – исследование истории формирования структурных ансамблей пояса: обобщение результатов многолетних исследований новейшей молассы Центрального Тянь-Шаня с целью восстановления истории формирования горного сооружения; проведение полевых работ по изучению новейшей молассы Зайсанской впадины с целью последующего сравнения новейшего развития Тянь-Шаня и Алтая; изучение плиоцен-четвертичных комплексов Северной Армении (район Джавахета) и Северо-Западного Кавказа с целью восстановления позднекайнозойской эволюции этих регионов. Вторая группа – сейсмотомографический анализ строения мантии под Альпийско-Гималайским поясом, исследование и геодинамическая интерпретация неоднородности проявлений новейших деформаций в литосфере пояса с целью оценки роли процессов течения и преобразования верхней мантии в новейшей тектонике и горообразовании.

История формирования новейших структурных ансамблей и рельефа Альпийско-Гималайского пояса

В *Центральном Тянь-Шане* в 2011–2012 гг. детально описаны и палеомагнитно опробованы три основных разреза межгорных впадин: Нарынской (южный борт) впадины,

Джумгалской (северный борт) и Иссык-кульской (южный борт). Описаны также разрезы других впадин. В 2013 г. выполнено предварительное (до получения всех результатов палеомагнитного опробования, которое сейчас выполнено наполовину) сопоставление разрезов с оценкой мощностей и скоростей накопления молассы в разные эпохи. В итоге, эволюция горной системы представляется следующим образом. В палеоцене и эоцене территория ЦТШ была пенепленом с относительными превышениями в первые сотни метров, принимаемым за предорогенную поверхность выравнивания. Переотложенная кора выветривания слагает красноцветную, преимущественно тонкообломочную и маломощную толщу с фауной среднего–позднего эоцена и, возможно, раннего олигоцена. В ее нижней части содержатся покровы базальтов с К-Аг и Аг-Аг возрастами 54–70 млн. лет. Олигоцен представлен мелкогалечными конгломератами и более тонкообломочными отложениями. Тот факт, что в составе гальки присутствует и местами составляет ведущую долю местный материал, доказывает, что именно в это время заложились основа современного структурного плана региона – зоны ещё низкогорных (судя по величине врезов) хребтов как области сноса и зоны впадин как области аккумуляции. В миоцене интенсивность движений ослабела, и скорости врезания уменьшились. Преобладают тонкообломочные (песчано-алеврито-глинистые, местами с эвапоритами) озёрные осадки, тогда как аллювиально-пролювиальные отложения занимают подчинённое место. Области осадконакопления расширились, перекрыв часть олигоценовых поднятий. Бассейны разделялись зонами плоских поднятий, служивших источниками сноса части обломочного материала. К югу и востоку, с приближением к высочайшим современным горам – хребту Кокшаал и массиву Хан-Тенгри, грубость обломочного материала возрастает, указывая на большие превышения и эрозию. В позднем миоцене несколько увеличились скорости врезания на склонах поднятий и аккумуляции обломочного материала во впадинах, что отмечено возрастанием содержания грубообломочных пород, сменяющихся более тонкообломочными вверх по разрезу. К концу плиоцена средняя высота ЦТШ, по-видимому, не превышала ~1 км, и лишь в районе Хан-Тенгри была больше. При высоте исходного пенеплена ~0,3 км поднятие в течение олигоцен–плиоцена составило в среднем ~0,7 км. В течение последних ~2 млн. лет происходит быстрый подъём гор ЦТШ, в который вовлекается и часть межгорных и предгорных впадин. Это доказывается возросшей интенсивностью врезания и формированием во впадинах грубой молассы. Средняя высота ЦТШ достигла ~3 км, а отдельные вершины поднялись до 6–7 км.

На южном борту *Зайсанской впадины* (Восточно-Казахстанская область), расположенной между хребтами Тарбагатай и Саур на юге и отрогами Алтая на севере, детально описаны разрезы кайнозойской молассы по долинам рек Калмакпай, Аксыир, Кусто

и Тайжузген. Проведена предварительная стратиграфическая корреляция разрезов по разным долинам и установлены основные закономерности в характере осадконакопления на разных этапах развития впадины. Из разрезов отобраны коллекции палеомагнитных (220 шт.) и палеонтологических образцов (более 150 шт.). Среди последних установлено несколько новых видов миоценовых млекопитающих, систематическая принадлежность которых сейчас уточняется. Палеомагнитное исследование отобранных образцов и определение палеонтологической коллекции позволят уточнить хроно-стратиграфию кайнозойской молассы Зайсана и, в сопоставлении с молассами впадин Центрального Тянь-Шаня, выявить тенденции неотектонического развития Центральной Азии от Тянь-Шаня до Алтая.

В *Северной Армении* начатые в 2003 г. археологические работы привели к открытию местонахождений каменной индустрии раннего (карьер Карахач и Мурадово) и среднего (карьер Куртан-1) ашеля (Беляева, Любин, 2013). Находки были датированы SIMS U/Pb методом (Presnyakov et al., 2012). Работы по нашему проекту Программы № 6 ОНЗ РАН, проводившиеся в 2012–2013 гг., имели целью, помимо решения задач проекта, выяснить геодинамические условия расселения древнего человека. Район работ – южная часть Джавахетского нагорья и примыкающие к ней молодые впадины, Верхнеахурянская на западе и Лорийская на востоке. Первая сейчас дренируется рекой Ахурян, которая продолжается на юг и впадает в р. Аракс, а вторая – рекой Дзерагет, которая восточнее сливается с р. Памбак, давая начало р. Дебет, впадающей в р. Кура. С юга впадины ограничены Базумским хребтом и его отрогами, сложенными породами юры, мела и палеогена с сутурой Мезотетиса. Джавахетское нагорье сложено вулканическими породами от базальтов до риолитов, которые в его грузинской части датированы K-Ar методом в интервале ~3.75–1.95 млн. лет (Лебедев и др., 2008). На северо-западе нагорья, в Сумсарском хребте, обособлены андезиты и дациты среднего–позднего плейстоцена, а ещё западнее, в долине Куры и на её левобережье – вулканогенно-осадочный верхний миоцен. Относительно кислые породы от андезитов до риолитов слагают вулканические постройки и их обрамления, а базальты и андезито-базальты распространяются далеко от центров извержений. Они заполняют днища впадин и продолжаются по долинам рек Дзерагета-Дебета, Машаверы и Ахуряна. Серия лавовых потоков Дзерагета-Дебета возле слияния Дзерагета с Памбаком имеет мощность ~220 м, а в верховьях Дебета достигает ~300 м. На поверхности лав залегают туфогенно-обломочные толщи, грубообломочная нижняя и тонкообломочная верхняя. Обе отложились прежде, чем началось интенсивное врезание Дзерагета-Дебета и Ахуряна, сформировавших ущелья в лавовых потоках.

На юго-западном краю Лорийской впадины нижняя толща представлена в карьере Карахач, дополненном шурфом. Здесь под современной почвой сверху вниз обнажены:

I. Неслоистый, плохо окатанный валунно-галечный материал, возможно, отложенный селем; до 9 м. В нижней трети обратно намагничен. В основании линза слоистого песка и гравия до 0.8 м.

II. Дацитовый аггломератовый туф, вверху, возможно, перемытый, а внизу (0.7 м) переходящий в пепел и туфогенный песок; до 5 м. Обратная намагниченность.

III.1. Суглинок с эрозионной нижней поверхностью; 0.15–0.5 м.

III.2–6. Гравийно-галечный материал с линзами валунника; 2.7–3 м. Несортированность и разноокатанность указывают на пролювиальное происхождение. Нормальная намагниченность.

III.7–9. Пепел, нормально намагниченный; ~0.7 м.

III.10. Валунно-галечный материал с суглинистым цементом; 1.5 м (видимые).

Ниже залегают подстилающие андезиты-базальты, но контакт не виден. Присутствие кристаллов циркона позволило датировать туфы методом SIMS U-Pb (Presnyakov et al., 2012). Для низов (1 м) слоя II получены даты: 1.750 ± 0.020 , 1.799 ± 0.044 , 1.804 ± 0.030 и 1.944 ± 0.046 млн. лет, а для слоя III.7–9 – 1.947 ± 0.045 млн. лет. Учитывая намагниченность слоёв и возможность удревнения туфа на величину до ~0.1 млн. лет методом SIMS U-Pb, дающим возраст кристаллизации циркона из расплава, а не отложения туфа, мы отнесли слои III к эпизоду Олдувай (1.95–1.77 млн. л.н.), а слои II и I – к верхам эпохи Матуяма (1.77–0.78 млн. л.н.), причём накопление туфа II произошло сразу после эпизода Олдувай.

В гравийно-галечных отложениях слоёв III.2–6, III.8 (линза в туфе) и III.10 найдены >300 предметов каменной индустрии, изготовленных из местного дацита. Среди них есть пики, примитивные рубила, чопперы и скрёбла, позволяющие отнести эту индустрию к ранней фазе ашеля. Столь раннее появление такой индустрии, вероятно, обусловлено природной плитчатостью дацита, избавлявшей от необходимости изготовления сколов-заготовок. В низах слоя II найдено >340 предметов, среди которых рубила отсутствуют.

Разрезы той же толщи вскрыты на северном борту Верхнеахурянской впадины. Возле с.Ёни-ёль это несортированные окатанные галечники с линзами песка; мощность 14–15 м. Галька, как и в разрезе Карахача, состоит из вулканических пород Джавахета. Контакт с подстилающим базальтом скрыт. Найдены артефакты, аналогичные слоям III Карахача.

Такая же окатанная галька обнаружена на Карахачском перевале между Лорийской и Верхнеахурянской впадинами (между истоками Дзерагета и р.Карахач бассейна Ахуряна).

Верхняя толща вскрыта в юго-восточной части Лорийской впадины на бортах долины Дзерагета. Информативные раскопы сделаны в карьере Куртан-1 на южном борту долины, где слои сокращаются в мощности с ЮЗ на СВ. Под современной почвой сверху вниз обнажены: (1) суглинок нормально намагниченный, 1–1.7 м; (2) суглинок, ниже супесь, вверху нормально, а ниже обратно намагниченные, 0.9–2.9 м; (3) обратно намагниченная супесь, 0.6–1.2 м, которая на юго-западном краю карьера наращивается снизу тонким песком (1 м) с базальной гравийно-галечной линзой до 0.2 м; (4) пепел с SIMS U-Pb датой

1.432±0.028 млн. лет (Presnyakov et al., 2012), 0.3 м; (5) обратно намагниченный разнозернистый рыхлый песчаник, до 1.8 м; (6) обратно намагниченная, горизонтально слоистая, перемытая пемза гравийно-песчаной размерности с SIMS U-Pb датой 1.495±0.021 млн. лет (Presnyakov et al., 2012), до 7 м; (7) обратно намагниченный базальт.

Пемзовая пачка 6 заполняет крутостенную ложбину (палеорусло?), врезанную в базальт. Остальные слои лежат на поверхности базальтового потока. Слои 1–3 содержат карбонатные стяжения, особенно многочисленные вверху каждого слоя и, вероятно, представляющие собой палеопочвы. Из этих слоёв происходит находка зубов носорога *Stephanorhinus hundsheimensis* (определение М. Белмейкер), характерного для позднего виллафранка–галерия (1.4– 0.5 млн. л.н.). В 2 км восточнее, на окраине с. Куртан, на перемытой пемзе, аналогичной слою 6, с размывом залегают пески и галечники (0.7–1.5 м). В 2012 г. Т.П. Иванова нашла в них костные остатки. А.С. Тесаков определил их как левую плечевую кость «южного слона», возраст которого древнее 0.5 млн. лет. Выше с перерывом залегают супесь с карбонатными стяжениями в верхней части, сходная со слоями 1–3 Куртана-1. Указанные находки и палеомагнитные определения позволяют относить слои 1–3 к концу нижнего – началу среднего плейстоцена. В слоях 2 и 3 Куртана-1 обнаружено более 200 артефактов, сделанных из местного базальта и риолита. Это единая индустрия, содержащая пики, рубила, чопперы, скрёбла. Рубило с удлинённым окончанием сходно с рубилами из среднего ашеля Латамны в Сирии.

В Верхнеахурянской впадине верхняя толща мощностью до 6–7 м вскрыта в южной части впадины, где она, по-видимому, залегают на базальтах плиоцена-гелазия. В разрезе карьера у с. Красар под современной почвой сверху вниз обнажаются: (1) тонкослоистые пески разной зернистости, 0.7 м; (2) глинистый песок с редкими линзами гравелита и грубого песка, 1.75 м; (3) песок, 0.8 м. Внизу слоя 1 найдены зубы грызунов, в том числе *Microtus sp.*, *Ellobius (Bramus) sp.*, а вверху слоя 3 – фрагменты костей оленя и бизона. Находки позволяют отнести толщу к верхам нижнего – низам среднего плейстоцена.

Полученные данные показывают, что в начале плиоцена на фоне низкогорного рельефа Базумского хребта на юге и ранних вулканов Дзерагета на севере в понижениях Верхнеахурянской и Лорийской впадин возникли широкие долины Пра-Ахуряна и Пра-Дзерагета-Дебета. Излияния базальтов и андезитов-базальтов заполнили эти долины, выравнив поверхность впадин. Верховья Пра-Ахуряна продолжались на восток через будущий Карахачский перевал в Дзерагет-Дебет, образуя единую речную систему. В эту эпоху (1.9–1.8 млн. л.н.) в условиях, близких к саванне, сюда проник древнейший человек. Начавшаяся тектоническая активизация обусловила слабый подъём северной части Верхнеахурянской впадины и Карахачского перевала. Водное сообщение между

впадинами прервалось, и в середине калабрия они превратились в систему озёр, связанных протоками. ~0.5 млн. л.н. тектонические движения резко активизировались. По бортам впадин оформились флексурно-разломные зоны с углами наклона базальтов до 20–30°, редко 70°. Они есть на юге Лорийской впадины и по краям Верхнеахурянской. Связанные с ними разломные уступы, продолжаясь, ограничили Карахачский перевал и восточный склон Дзерагета. Произошёл подъём региона. Лорийская впадина достигла высоты 1500–1600 м, Верхнеахурянская – 2000 м, Карахачский перевал – 2250 м. Вероятно, впадины поднялись на величину ≥ 500 м, а смежные хребты – на ≥ 1000 м.

Древнейший человек, появившийся ~2.6 млн. л.н. в тогда активной области Великих африканских разломов, обитал в озёрных котловинах и слабо врезанных речных долинах с ландшафтами саванны среди вулканических образований и на почвах, обогащённых процессами вулканизма. Для всех выявленных мест обитания древнего человека в Палестине, Сирии, Армении и Грузии характерны сходные условия. Это тектоническая активность, обусловившая формирование долин с озёрами, речными протоками и водными источниками, саванные ландшафты и проявления вулканизма, недавнего или современного древнему человеку. Наличие воды и почвы, обогащённые вулканизмом, обусловили своеобразие растительности, предопределившее обилие травоядных животных, вслед за которыми двигались хищники и среди них человек. Вулканические породы служили материалом для каменных орудий.

На *Северо-Западном Кавказе* обоснован четвертичный возраст поднятия Ахунской и Голицинской антиклиналей Сочинского района. Показано, что и в осевой части горной системы (район Ачишхо) продолжается поднятие складчатого хребта под действием четвертичного сжатия.

Роль процессов течения и преобразования верхней мантии в новейшей тектонике и горообразовании в Альпийско-Гималайском поясе

Возникновение локальных поднятий на разных стадиях первого этапа горообразования, согласно выполненным измерениям и расчётам, было изостатической реакцией на утолщение коры коллизионным сжатием. Этот же фактор продолжал действовать во второй этап, но не мог обеспечить полностью высокую скорость поднятия. В некоторых горных системах (Большой Кавказ, Карпаты, Альпы) сжатие ослабело по сравнению с предшествовавшими стадиями максимальных деформаций. В других (Гималаи, Памир, Центральный Тянь-Шань) оно возросло, но и там могло обеспечить <40% амплитуды суммарного плиоцен-четвертичного воздымания. К тому же в поднятие были вовлечены и многие межгорные впадины, что невозможно объяснить сжатием.

Выполненные исследования приводят к выводу, что главными источниками поднятия второго этапа были разуплотнение верхов мантии и ретроградные преобразования высоко метаморфизованных пород корового происхождения вблизи границы кора–мантия. Разуплотнение верхов мантии выявлено интерпретацией гравиметрических данных и/или результатов сейсмических исследований под Гималаями, Тибетом, Куньлунем, Памир-Гиндукуш-Каракорумским регионом, Центральным и Восточным Тянь-Шанем, Малым Кавказом, Карпатами и Альпами. Наиболее вероятная причина разуплотнения – частичное замещение мантийной литосферы менее плотным астеносферным веществом или метаморфическое преобразование её пород астеносферными флюидами. Вероятность метаморфического разуплотнения пород вблизи границы кора–мантия впервые продемонстрирована нами на примере ЦТШ. В дальнейшем было показано, что этот фактор мог быть решающим при подъёме Большого Кавказа и Западного Тянь-Шаня. Встаёт вопрос о причинах разуплотнения низов коры и верхов мантии.

По сейсмотомографическим материалам, полученным на основе глобальной сети (Becker, Boschi, 2002; Grand et al., 1997; Van der Hilst et al., 1997), были построены сейсмотомографические профили мантии поперёк и вдоль Альпийско-Гималайского пояса. В 2013 г. эти построения были уточнены, в частности, показано сходство строения мантии Индонезийского сегмента пояса и окраин северо-востока Азии, где большинство зон субдукции на глубинах 400–700 км переходят в горизонтальные высокоскоростные линзы, уходящие в сторону континента («большой мантийный клин», BMW) . Сопоставление сейсмотомографических данных с геолого-геофизическими данными о строении и развитии Альпийско-Гималайского пояса позволило предложить следующую модель воздействия верхнемантийных процессов на неотектонику и горообразование.

Эфиопско-Афарский суперплюм как область пониженных скоростей сейсмических волн образует субмеридиональную зону, охватывающую пояс вулканических рифтов Восточной Африки. От него распространяются потоки верхнемантийного вещества, достигающие северных окраин Альпийско-Гималайского пояса. На профилях через Аравийско-Иранский сегмент пояса следы подлитосферного потока фиксируются пониженными скоростями сейсмических волн на всю глубину верхней мантии, тогда как на профиле через Тибет следы потока непосредственно подстилают тонкую литосферу Индийского океана, но севернее над ними находится линза с повышенными значениями dV_p , соответствующая утолщённой литосфере Индийской плиты и Высокой Азии.

Мы предполагаем, что Эфиопско-Афарский суперплюм развивался более или менее стационарно, по меньшей мере, с конца палеозоя и до кайнозоя был протяжённее, чем сейчас. Части перемещавшейся Гондваны, оказывавшиеся над суперплюмом, испытывали

рифтинг, перераставший в спрединг, который сформировал океан Тетис. Поток астеносферного вещества от суперплюма обусловил асимметрию спрединга и движение отделявшихся гондванских фрагментов на северо-восток в сторону Евразии. Там океанская литосфера Тетиса субдуцировала, а фрагменты Гондваны причленились к Евразии, отчего зоны субдукции перемещались к их тыловым частям. Так на месте будущего горного пояса возникла серия микроплит, разделённых сутурами, аккреционными телами и проявлениями магматизма разных стадий развития Тетиса. Строение мантии под Индонезийским сегментом, где описанный процесс продолжается до сих пор, позволяет предположить, что под другими сегментами субдуцировавшие слэбы также переходили на глубинах 400–700 км в BMW, продолжавшиеся под будущий горный пояс. Реликтами BMW под Южным Тибетом могут быть утолщение верхнего высокоскоростного слоя (до 400 км) и линза слабо повышенных значений V_S на глубинах ~600 км. На профиле dV_P эти две линзы разделены слоем пониженных скоростей, который продолжает подлитосферный поток от Эфиопско-Афарского суперплюма.

Различия сегментов пояса связаны с их разной кайнозойской историей. Если в Индонезийском сегменте его островодужная структура сохраняется до сих пор, то в других сегментах реликты Неотетиса и его задуговых бассейнов закрылись в интервале с конца эоцена до среднего миоцена. Соответственно, процессы субдукции и формирования BMW сменились коллизией плит Евразии и гондванского ряда. Это замедлило их сближение, но астеносферный поток от Эфиопско-Афарского суперплюма, вероятно, продолжил прежнее движение и постепенно распространился под весь орогенический пояс. Это происходило постепенно. Так, подлитосферный слой пониженных скоростей утоняется под Большим Кавказом, что могло быть связано с тем, что до среднего миоцена кавказские прогибы Паратетиса пододвигались, по данным М.Г. Леонова, под Малый Кавказ, и субдукция препятствовала проникновению подлитосферного потока к северу.

«Горячий» подлитосферный поток переработал верхнюю мантию Альпийско-Гималайского пояса. Это выразилось в пониженных усреднённых V_P верхов мантии под всеми горными системами пояса, кроме части Гималайско-Тибетского региона. Понижение скоростей может отражать утонение литосферы за счёт астеносферы и/или разуплотнение литосферной мантии и низов коры под воздействием астеносферы. Под Высокой Азией, где литосфера наиболее утолщена кайнозойскими деформациями, над слоем пониженных V_P сохраняется высокоскоростной слой мощностью до 300 км.

Изучение магматических пород мантийного происхождения свидетельствует о крайне низком содержании воды в магматических источниках. Вместе с тем, скорости сейсмических волн возрастают с глубиной, причём на определённых рубежах изменяются

на доли км/с. Такие скачки связывают с изменением плотности пород, которое не может быть достигнуто только их уплотнением под нагрузкой вышележащих слоёв, но предполагает изменение кристаллохимии минералов. Согласно данным, приводимым Ю.М. Пущаровским и Д.М. Пущаровским, на глубинах 50–100 км пироксены метабазитов и ультраосновных пород начинают переходить в более плотные гранаты. Ниже чётки и повсеместны сейсмические разделы на глубинах ~410 км и ~670 км, ограничивающие «переходный» слой мантии. С верхним из этих разделов связан переход оливина с ромбической сингонией в его разновидности со шпинелевой структурой (вадслеит, переходящий на глубине ~520 км в рингвудит), что увеличивает плотность минерала на величину до 8%. Примерно на той же глубине клинопироксен трансформируется в вадслеит и стишовит. В интервале глубин от 410 до 500 км пироксены приобретают более компактную структуру типа ильменита. Глубже 670 км перечисленные минералы замещаются более плотными перовскитоподобными фазами, на долю которых приходится ~80% объёма нижележащей мантии. Приводятся аргументы в пользу того, что кристаллохимическая структура вадслеита и рингвудита допускает замену части анионов кислорода этих безводных минералов на гидроксильные группы. Их источником могут быть субдуцируемые слэбы, которые содержат амфиболиты и метаосадочные породы и полностью или частично переходят в BMW на уровне 410–670 км, а также поступления глубинного водорода. На присутствие флюидов указывают сильное затухание поперечных волн при слабом изменении их скорости и повышенная электропроводимость.

В процессе движения подлитосферный поток обогащался источниками водных флюидов, которые могли происходить из прежних BMW, связанных с зонами субдукции. Активизированная таким образом астеносфера или её флюиды, проникавшие в литосферу, вызвали в позднем кайнозое ряд геологических процессов. Они спровоцировали формирование литосферных, в том числе коровых, магматических очагов и, согласно Е.В. Артюшкову, обусловили размягчение литосферы, что привело на первом этапе к её интенсивным деформациям, тектоническому расслоению, большим латеральным перемещениям и, как результат, поднятиям поверхности. Деформации первого этапа, сопровождавшиеся метаморфизмом и коровым магматизмом, обусловили консолидацию земной коры к началу плиоцена. Она выразилась отсутствием крупных послемiocеновых гранитных массивов, локализацией вулканизма в сдвиговых зонах, а также тем, что сдвиги стали ведущей формой реализации сокращения пояса, тогда как складчато-надвиговые деформации сконцентрировались во впадинах с мощным осадочным чехлом. Под консолидированной корой воздействие астеносферы на литосферу усилилось. Именно этим воздействием обусловлены разуплотнение верхов мантии под многими горными

сооружениями и предполагаемые ретроградные преобразования высоко метаморфизованных пород корового происхождения вблизи границы кора–мантия. Разуплотнение верхов мантии и низов коры резко ускорило тектонический подъём и формирование горных систем.

Реализации указанных процессов способствует периодическое возрастание действующих в земной коре тектонических сил. Оно выявлено в активных зонах Альпийско-Гималайского пояса изменениями сейсмичности с периодами 1300–1800 лет, накладывающимися на «обычные» сейсмические циклы. Установлено, что такие изменения в зоне разлома Эль-Габ, Сирия, коррелируются с вариациями скорости накопления упругой деформации, отражающими изменения напряженно-деформированного состояния региона.

Заключение

Задачи исследований по проекту в 2013 г. выполнены полностью. Вместе с тем, общие цели проекта достигнуты не полностью, и часть сформулированных вопросов нуждается в уточнении или развитии. Так, остаётся неясным, существует ли пространственная закономерность в переходе от первого этапа горообразования ко второму. Решить это, хотя бы частично, позволят дополнительные полевые исследования и завершение палеомагнитных определений и других аналитических работ, направленных на уточнение возраста тех или иных геологических событий. Более общая проблема – возможность тектонического течения горных масс на мантийном уровне. Отчасти она затронута выявленным эффектом изменения напряженно-деформированного состояния в зонах концентрации деформаций, который нуждается в проверке на более обширном материале. Другой аспект той же проблемы требует исследования структурированности геологической среды, течение которой может осуществляться перемещениями в локальных зонах, вплоть до межзерновых скольжений, при сохранении прочности зёрен или более крупных объёмов среды.

Публикации 2013 г. по теме данного проекта Программы № 6 ОНЗ РАН

1. *Трифонов В.Г.* Цикличность позднеголоценовой сейсмичности в Альпийско-Гималайском поясе // Геотектоника. 2013. № 6. С. 3–17. DOI: 10.7868/S0016853X13060064.
2. *Буланов С.А. Трихунков Я.И.* Инверсия складчатого рельефа как показатель тангенциального сжатия земной коры // Геоморфология. 2013. № 1. С. 68–73.
3. *Trifonov V.G., Bachmanov D.M., Simakova A.N., Trikhunkov Ya.I., Ali O., Tesakov A.S., Belyaeva E.V., Lyubin V.P., Veselovsky R.V., Al-Kafri A.-M.* Dating and correlation of the Quaternary fluvial terraces in Syria, applied to tectonic deformation in the region // Quaternary International. 2013; doi: 10.1016/j.quaint.2013.10.063.