

## Итоговый отчет 2017-2019 по Проекту РФФИ 17-05-00727

Поперечная неотектоническая сегментация Альпийско-Гималайского коллизионного пояса: сопоставление Аравийско-Кавказского и Ирано-Каспийского сегментов и их сравнение с другими сегментами пояса

### РАЗВЕРНУТЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

В соответствии с Заявкой, цель и задачи фундаментального исследования – определить основные параметры и причины поперечной сегментации новейших горно-складчатых коллизионных поясов на примере центральной части Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. Для этого планируется выполнить сопоставление Аравийско-Кавказского и Ирано-Каспийского сегментов и их сравнение с другими сегментами пояса.

Важнейшие результаты работ по Проекту изложены в одной опубликованной монографии и в трех статьях в рецензируемых журналах, из которых две опубликованы и одна находится в печати. Исходными материалами для этих публикаций явились результаты полевых работ по проекту и обработки полевых материалов, анализ и обобщение ранее полученных авторами данных и многочисленного литературного материала от отдельных публикаций до мировых баз данных, таких как глобальная топографическая модель рельефа с разрешением 3", сейсмотомаграфические данные глобальной сети и Новая база данных об активных разломах Евразии, созданная авторами Проекта во время его реализации. Полевые работы, результаты которых использованы для реализации Проекта, частью выполнялись целиком на средства Проекта (научные командировки в Иран для проведения полевых работ в Эльбурсе в 2018 г.), частью финансировались из средств Проекта лишь в той мере, в какой их результаты были использованы для решения его задач (командировки и полевые работы в Крыму и на СЗ Кавказе, в Армении и Восточной Турции). Часть средств Проекта ушла на оплату той части аналитической обработки полевых материалов, которая осуществлялась сторонними организациями.

Отметим результаты выполненных полевых исследований, наиболее важные для реализации цели и задач Проекта. В субширотной Керченско-Таманской складчатой области выявлено омоложение возраста последних интенсивных фаз складчатых деформаций от периферических (западной и восточной) частей зоны к ее центральной части – Таманскому сегменту. Эти складчатые деформации произошли не позднее начала среднего миоцена на юго-западе Керченского п-ва и на восточной оконечности зоны, в позднем плиоцене на севере и востоке Керченского п-ва и в Азовской зоне в районе г. Крымска и продолжают до сих пор в Таманском сегменте. Границы всей Керченско-Таманской области и ее Таманского сегмента обозначены поперечными флексурно-разломными зонами, которые являются элементами поперечной сегментации отдельных тектонических зон внутри крупных сегментов Альпийско-Гималайского пояса (АГП).

Значительным результатом полевых работ в Северной Армении и СВ Турции стало выявление двух факторов образования и плиоцен-четвертичного развития новейших межгорных впадин. Эти факторы: (1) смещения по новейшим разломам, значение которых наиболее ярко проявлено в присдвиговых впадинах Памбак-Севан-Сюникской правосдвиговой зоны; (2) преобразования и перемещения горных масс на уровне верхней мантии, выраженные вулканическими проявлениями внутри и на обрамлении впадин. Второй фактор наиболее отчетливо проявлен в Ширакской впадине. Выявлена важная роль в пространственном распределении вулканизма и строении впадин Транскавказского поперечного поднятия, являющегося одним из элементов поперечной сегментации Кавказского региона.

Полевые работы в Эльбурсе (Северный Иран) обнаружили отличия неотектонического развития южного побережья Каспия от Керченско-Таманской складчатой области на северной границе Аравийско-Кавказского сегмента АГП, в частности, то обстоятельство, что на значительных участках южного побережья Каспия море трансгрессировало на береговые структуры в четвертичное время. Выявлены структурные и вещественные особенности продолжений тектонических зон Кавказа в Ирано-Каспийском сегменте АГП.

Обратимся теперь к результатам работ по Проекту, изложенным в публикациях.

1. *Трифонов В.Г. Неотектоника подвижных поясов* // М.: ГЕОС, 2017. 180 с. (издательский грант РФФИ № 17-15-00120). Монография состоит из «Введения», двух частей и «Заключения». Они снабжены 63 рисунками, 5 таблицами и списком литературы из 383 названий.

В первой части книги рассмотрены тектонотипы различных новейших геодинамических обстановок. Она состоит из трёх глав, посвящённых рифтовым системам (гл. 1), областям субдукции (гл. 2) и коллизии (гл. 3). В главе 1 обсуждаются Байкальская и Исландская рифтовые системы. В Байкальской системе описаны проявления растяжения рифтовых зон ЮЗ–СВ простирания и субширотного левого сдвига на окончаниях рифтовой системы; общее нарастание проявлений рифтогенеза в ходе неоген-четвертичного развития; распространение области наибольшего опускания в Байкальской рифтовой зоне с ЮЗ на СВ. Байкальская рифтовая система вписывается в общую кинематику движения блоков литосферы к СВ от области Индо-Евразийской коллизии и, вместе с тем, соответствует области разуплотнения верхней мантии, на границе которой с «нормальной» мантией Сибирской платформы находится Байкальская рифтовая зона. Оба эти фактора обусловили образование рифтовой системы. В Исландской рифтовой системе описаны структурно-вулканические проявления её поперечного раздвигания со скоростью ~10 мм/год и структурные перестройки в ходе её плиоцен-четвертичного развития. Утонение земной коры и разуплотнение верхов мантии выражено в Исландской рифтовой системе сильнее, чем в Байкальской. Они являются крайними членами группы новейших структур растяжения. В Восточно-Африканской рифтовой системе представлены Западный пояс рифтовых зон байкальского типа и Восточный пояс вулканических рифтовых зон, которые характеризуются разуплотнением верхней мантии и утонением коры, перерастающим затем в её разрыв и спрединг, приводящий к раздвиганию континентальных блоков и формированию рифтов океанского типа.

В главе 2 на примере Курильского сегмента Курило-Камчатской островодужной системы охарактеризованы главные элементы этого типа структур: преддуговой глубоководный жёлоб; внешнее антиклинальное поднятие и за ним внешний прогиб; внутренний вулканический перекомпенсированный прогиб (вулканическая дуга); тыловой прогиб (краевое море). Сегмент характеризуется субконтинентальным, а в центре субокеаническим строением коры. Южная Камчатка близка по строению к Курилам, а Центральная Камчатка, расположенная на утонённой континентальной коре, построена сложнее. В ней выделяется несколько вулканических поясов и продольная грабенообразная Центральная Камчатская депрессия с признаками листрического строения пограничных разломов. Эти структуры демонстрируют признаки поперечного раздвигания при поперечном укорочении, выраженным пододвиганием океанской литосферы по сейсмофокальной зоне. Северо-восточнее участка локальной коллизии хр. Кумрач и структур п-ва Камчатский (части Алеутской островной дуги) признаки новейшей субдукции не продолжают. При сравнении Курило-Камчатской системы с другими островными дугами и активными континентальными окраинами выявляется разнообразие этого класса структур.

В обширной главе 3 рассматриваются коллизионные сегменты Альпийско-Гималайского пояса (АГП). Для него характерны продольная зональность, выраженная последовательным омоложением разных стадий развития Тетиса с С–СВ на Ю–ЮЗ, и поперечная сегментация, отражающая уменьшение поперечного укорочения пояса с ВЮВ на ССЗ и подчёркнутая зонами поперечных разломов. Последняя особенно важна для целей данного проекта. Охарактеризованы: (1) Памиро-Гималайский регион и Центральная Азия; (2) Аравийско-Кавказский регион; (3) Альпийская Европа. В регионах (1) и (2) описаны активные разломы (проявления современной геодинамики), потом новейшая структура и история её развития.

Регион (1). Неотектонические зоны Центрального Тянь-Шаня представлены хребтами-антиклиналями и синклиналильными межгорными впадинами, осложнёнными и разделёнными взбросами, надвигами и взбросо-сдвигами. Выделены две стадии развития – медленное поднятие хребтов в течение первых ~28 млн лет, определяемое коллизионным сжатием, и быстрое поднятие последних 2 млн лет, в 3–5 раз превосходящее то, которое может быть связано с поперечным сжатием и укорочением структур, и обусловленное, главным образом, разуплотнением пород верхов мантии и на границе кора-мантия. В Памиро-Гималайской части региона описаны мезозойско-кайнозойские тектонические зоны, продолжающиеся на западе в Афганистан и на востоке в Тибет и Гималаи, их значительные горизонтальные смещения и деформации, происходившие в течение длительной первой стадии новейшего тектогенеза. В течение второй, плиоцен-четвертичной, стадии скорость поднятий резко возросла, что связано, как и в Центральном Тянь-Шане, не столько с

усилением поперечного сжатия структурных зон, сколько с разуплотнением верхов мантии и низов коры. Мантийные землетрясения Памиро-Гиндукушской зоны обусловлены погружением в мантию океанских базитов, метаморфически уплотненных до мантийных значений.

Регион (2). На северном фланге Аравийской плиты реликты Неотетиса закрылись в конце эоцена, а на её северо-восточном Загросском фланге в среднем миоцене, обозначив начало коллизии Аравии с континентальными блоками внутренних зон будущего горного пояса и южной частью Евразийской плиты. На фоне сложной структурной дифференциации обозначились крупные элементы: зона краевых надвигов, Южно-Таврского и Загросского; пояс замкнувшихся в конце раннего миоцена – среднем миоцене прогибов Паратетиса; поднятие Большого Кавказа, оформившееся в среднем миоцене. Плиоцен-четвертичное усиление поднятий выразилось появлением грубой молассы во впадинах. Особенность региона (2) – интенсивный новейший вулканизм. Рассмотрены два его аспекта: 1) структурный контроль центров извержений и 2) геодинамическая позиция магматических очагов, в которых присутствует глубинный материала мантии. Часть областей новейшего вулканизма вытянута вдоль орогенического пояса, примерно совпадая с возможным положением слэбов океанской литосферы Мезотетиса. Они могли стать источником магматических очагов при неотектонической активизации. Другая часть протягивается широкой полосой от Эфиопии вдоль западного края Аравийской плиты на ССВ до Эльбруса и Казбека. Отмечено постепенное омоложение первых проявлений новейшего вулканизма от начала эоцена в Эфиопии до конца плиоцена в районе Эльбруса. Это даёт основание предполагать существование потока подлитосферной мантии, распространявшегося к северу и питавшего магматические очаги.

Регион (3). Под названием Альпийской Европы рассмотрена западная часть АГП на европейском и африканском берегах Средиземного моря. Определяющей является современная граница Африканской и Евразийской литосферных плит. В этой системе Адриатический выступ подобен северному выступу Аравийской плиты и Пенджабскому выступу Индийской платформы, но его структура и новейшее развитие были существенно видоизменены в раннем миоцене образованием Азоро-Гибралтарской сдвиговой зоны и связанными с ней вращением блока Корсика–Сардиния и общим изменением поля тектонических напряжений в регионе. В плиоцен-квартере вертикальные движения усиливаются без возрастания скорости сжатия, и возникают современные горные системы. В Альпийской Европе широко распространены новейшие впадины. Некоторые из них имеют сложный, многофакторный генезис. Деформации, связанные с погружением высокометаморфизованных пород в разуплотнённую верхнюю мантию под Восточными Карпатами, привели к образованию Вранчского мегаочага мантийных землетрясений.

Во второй части монографии обсуждаются общие вопросы неотектоники подвижных поясов. Первая глава второй части посвящена явлениям и процессам, заставляющим модернизировать классическую теорию тектоники литосферных плит (плейт-тектоники): диффузность (рассредоточенность) границ плит; переход большинства субдуцируемых слэбов в субгоризонтальные линзы (big mantle wedges, BMW), продолжающиеся в сторону континентов на уровне переходного слоя мантии (~400–700 км); тектоническая расслоенность литосферы, из-за которой нижняя часть земной коры может играть для верхней части коры такую же геодинамическую роль, какую играет астеносфера по отношению к литосфере в целом.

Вторая глава второй части посвящена новейшему горообразованию. В АГП повсеместно выделяются две его стадии. В течение длительной первой стадии, начавшейся чаще всего в олигоцене, возникли субаэральные поднятия (обычно не выше среднегорных) в местах концентрации деформаций. В течение короткой второй стадии (последние 2–7 млн лет) резко усиливаются вертикальные движения, высота поднятий возрастает в 2–3 раза, и формируется современный горный рельеф. Ускорение вертикальных движений происходит, главным образом, из-за разуплотнения верхов мантии и/или высокометаморфизованных пород корового происхождения вблизи границы кора-мантия. Те же две стадии горообразования выявлены в других горных поясах Земли. Для выяснения особенностей второй стадии исследованы данные мировой сети и построены сейсмотомографические профили мантии. Выявлен общемантийный Эфиопско-Афарский суперплюм, от которого под АГП распространяются подлитосферные верхнемантийные потоки с пониженными скоростями сейсмических волн. Коллизия замедлила сближение гондванских плит с Евразийской плитой, но эти потоки продолжили прежнее движение и распространились под северную окраину бывшего Тетиса. В процессе движения они перерабатывали верхнюю мантию

региона, в том числе переходный слой мантии, обогащённый источниками флюидов, содержащихся в BMW. Материал активизированных таким образом подлитосферных потоков стал замещать литосферную мантию, а флюиды воздействовали на высокометаморфизованные породы вблизи границы кора-мантия, вызывая их ретроградный метаморфизм. Оба процесса привели к разуплотнению пород, что стало причиной резкого усиления поднятий во вторую стадию.

В последней, третьей главе второй части предлагается модель новейшего тектогенеза, названная тектоникой мантийных течений. Она обобщает результаты исследований, изложенные в предыдущих главах. Основные положения новой модели таковы. (1) Тектонические процессы обусловлены общемантийной конвекцией. (2) Восходящую ветвь конвекции образуют общемантийные плюмы типа Эфиопско-Афарского и Центрально-Тихоокеанского. (3) От общемантийных плюмов распространяются подлитосферные верхнемантийные потоки, которые из-за вязкого трения перемещают литосферные плиты. (4) Поскольку большинство зон субдукции переходит в горизонтальные линзы (BMW) на уровне переходного слоя мантии (400–700 км), нисходящая ветвь общемантийной конвекции более рассеяна, чем восходящая ветвь, и реализуется также путём отрыва и погружения плотных нижнелитосферных масс под кратонами и областями наиболее интенсивной коллизии. (5) В эпохи широкого распространения коллизии она замедляет движение плит, и подлитосферные потоки распространяются дискордантно к плитам под соседние с коллизией области. Активизированная флюидами мантия потоков частично замещает мантийную часть литосферы, а флюиды потоков вызывают метаморфические преобразования литосферы, приводящие к её разуплотнению. Это является причиной резкого усиления вертикальных движений во вторую стадию горообразования. (6) Аналоги второй стадии выделяются в конце герцинского (артинский век) и каледонского (эйфельский век) тектонических циклов. Эти короткие стадии были эпохами перестройки системы движения плит и, возможно, системы мантийных течений.

*2. Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. Структура мантии и тектоническая зональность центральной части Альпийско-Гималайского пояса // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 4. С. 1127–1145, doi: 10.5800/GT-2018-9-4-0386.*

Согласно геологическим и неотектоническим данным, приведенным в вышеописанной книге [Трифонов, 2017], центральная часть АГП разделяется на Анатолийско-Кавказско-Иранский и Памиро-Тибет-Гималайский мегасегменты. Первый из них, в свою очередь, состоит (с запада на восток) из Эгейско-Балканского, Анатолийско-Черноморского, Аравийско-Кавказского, Ирано-Каспийского и Афгано-Таджикского сегментов. Для оценки выражения сегментации центральной части АГП в структуре подлитосферной верхней мантии и соотношения этих верхнемантийных неоднородностей с сегментацией пояса на уровне земной коры составлены и исследованы 12 продольных и поперечных к простиранию пояса скоростных разрезов мантии. На разрезах, построенных на основе объемной сейсмотомографической модели вариаций скоростей продольных (P) волн MIT-P08 [Li et al., 2008], отражены отклонения скоростей P-волн от среднего значения первого приближения ( $\delta V_p$ ), заданные в (%). Модель MIT-P08 ориентирована, прежде всего, на исследование неоднородностей верхней мантии, поскольку детальность дифференциации по скоростям продольных волн в ней выше, чем в нижней мантии. Для построения разрезов в произвольных, заданных авторами направлениях использовалась оригинальная, разработанная С.Ю. Соколовым программа. Разрезы охватывают часть пояса от Адриатики и Карпат до Западного Тянь-Шаня, Памира и Западных Гималаев, а также соседние с поясом части Восточно-Африканской рифтовой системы, Аравийской, Туранской, Скифской плит и Восточно-Европейской платформы.

Анализ построенных разрезов позволил определить положение и направления низкоскоростных (т.е. характеризующихся пониженными скоростями P волн) верхнемантийных потоков разной интенсивности, распространяющихся в северных румбах от сложно построенного и, в целом, меридионально удлинённого Эфиопско-Афарского суперплюма, и сочетание этих потоков с высокоскоростными объёмами, погруженными в мантию в результате субдукционных и коллизионных межплитных взаимодействий. Мощный поток от суперплюма прослеживается до Южной Аравии, где разветвляется. Его западная ветвь следует от Южной Аравии севернее Красного моря в Сирию, а восточная идёт в Иран. Севернее западная ветвь вновь разветвляется. Один поток продолжается на север и достигает Большого Кавказа и Керченско-Таманской области, где утоняется. Вероятно, он поворачивает на запад и в утонённом виде прослеживается под Чёрным морем и к западу от него, достигая Карпат. Причиной поворота, по-видимому, является высокоскоростной структурный барьер Скифской плиты и Восточно-Европейской платформы. Более

южное ответвление западного потока следует до Центральной Турции, но западнее прерывается относительно высокоскоростными объёмами верхней мантии, т.е. в Грецию и Италию не продолжается. Ещё более южное ответвление западной ветви потока уходит под Средиземное море, откуда потоки с пониженными значениями  $\delta V_p$  поступают в Альпийскую Европу. Иранская ветвь подлитосферного потока достигает Среднего Каспия и севернее деградирует. Восточное ответвление Иранской ветви уходит на севере до Копетдага, а на востоке достигает границы Пакистана и Афганистана. В Афганистане поток выражен фрагментарно. Над наиболее интенсивными потоками, а также под Центральным и Восточным Кавказом мощность литосферы сокращается до  $\sim 80$  км, и она характеризуется пониженными значениями  $\delta V_p$ .

Выделяются области субдцированных слэбов с повышенными значениями  $\square V_p$ . Они соответствуют зонам субдукции разных эпох мезозоя и кайнозоя и зонам скопления очагов промежуточных землетрясений. Такие области обнаружены:

- под Западными Динаридами – до 300 км; наклонена на восток; вероятно, соответствует зоне позднекайнозойской субдукции;
- под западной частью Крито-Эллинской дуги – до 700 км; наклонена на восток, соответствует зоне современной субдукции;
- в зоне Вранча – до 150–200 км; круто наклонена на восток, к ней приурочен мегаочаг промежуточных землетрясений;
- под Кипром и к югу от Понтид юго-западнее г. Синопа – первая из зон выделяется на глубинах 100–300 км и наклонена на север, а вторая прослеживается почти от поверхности и наклонена на юг; на глубине зоны сходятся, достигая  $\sim 500$  км;
- под Загросом – до 150 км в районе г. Керманшаха и до 250 км вблизи границы провинций Дезфул и Фарс; в обоих участках позднекайнозойский слэб наклонён на северо-восток, но на юге от него на глубинах 100–200 км отходит на северо-восток короткая линза со слабо повышенными значениями  $\delta V_p$ ;
- севернее Макрана – на глубинах 200–700 км, наклонена на север; возможно, соответствует кайнозойской зоне субдукции.

Под Центральным Кавказом на глубинах 370–700 км впервые выявлен относительно высокоскоростной объём подогнутой Скифской плиты, который далее к югу фрагментарно продолжается ещё ниже под Малый Кавказ. Признаки аналогичного, но малоамплитудного пододвигания отмечены под Степным Крымом. На разрезе через Керченско-Таманскую складчатую область такого пододвигания не выявлено, а на разрезе через Восточный Кавказ оно выражено слабо изолированным объёмом относительно высокоскоростной мантии на глубинах 350–500 км. С указанным поддвигом Скифской плиты может быть связано аномальное воздымание Центрального Кавказа в киммерийскую эпоху складчатости, приведшее к выходу в этом сегменте палеозойского фундамента на земную поверхность.

Вместе с тем, под Нижне-Куриной впадиной на глубинах до 150–170 км выделяется слэб, наклонённый на северо-восток. Он примерно соответствует зоне Кюрдамир–Саатлы, где выявлен гравитационный максимум, а разрез Саатлинской сверхглубокой скважины глубже 3540 м до забоя 8324 м сложен вулканогенными породами островодужного типа, состав которых изменяется снизу вверх от дацитов и андезитов до базальтов. Наиболее представительные Rb-Sr и K-Ar даты вулканитов и единичные находки радиоларий в туффите охватывают интервал времени от средней юры до раннего мела, причём наиболее многочисленны и достоверны позднеюрские даты. Возможно, этот слэб соответствует зоне средне-верхнеюрской субдукции Мезотетиса, завершившейся коллизией в раннем мелу [Саатлинская сверхглубокая, 2000].

На границе с Памиро-Тибет-Гималайским мегасегментом содержание относительно высокоскоростных верхнемантийных объёмов возрастает. Обширный объём с повышенными значениями  $\delta V_p$  выделяется на глубинах до 250 км под севером Афганистана юго-западнее Афгано-Таджикской депрессии. Восточнее Гиндукушский мегаочаг промежуточных землетрясений выражен круто наклонённым на восток высокоскоростным клином глубиной до 600 км. От мегаочага на восток, под Центральный Памир, куда продолжается Памиро-Гиндукушская зона промежуточных землетрясений, протягивается высокоскоростной слой на глубинах 100–320 км. Южнее, под

Бадахшаном, из-за наличия высокоскоростных объёмов поток с пониженными значениями  $\square V_p$  сокращается в мощности и огибает эти объёмы на больших или меньших глубинах. Далее к югу наклонённый на восток высокоскоростной объём глубиной до 400 км выявлен под северо-западным флангом Индийской платформы (северное окончание зоны Кветта). От него отходит на восток высокоскоростной слой на глубинах 100–300 км.

Таким образом, в виде слэбов выделяются не только мантийные сейсмофокальные зоны типа Вранча и Гиндукуша, современные зоны субдукции и подобные образования Неотетиса (Крито-Эллинская дуга, Главный надвиг Загроса, область севернее Макрана, северное окончание зоны Кветта), но и некоторые мезозойские зоны субдукции (Кюрдамир-Саатлинская зона в Азербайджане и область внутри Карпатской дуги, погребённая под верхнемантийным потоком и выделяемая на глубинах 400–750 км). Особая разновидность слэба связана с пододвиганием Скифской плиты под Большой Кавказ. Вместе с тем, некоторые важные зоны субдукции Неотетиса (например, зона Таврского надвига) не находят отражения в структуре верхней мантии, будучи переработаны интенсивным верхнемантийным потоком с пониженными значениями  $\square V_p$ .

Среди элементов поперечной сегментации АГП в скоростной структуре верхней мантии наиболее контрастно проявлены границы Анатолийско-Кавказско-Иранского мегасегмента с соседними мегасегментами, Альпийско-Адриатическим и Памиро-Тибет-Гималайским. Поскольку граница с Памиро-Тибет-Гималайским мегасегментом отмечена появлением значительных объёмов верхней мантии с повышенными значениями  $\square V_p$ , проникновение потоков в этот мегасегмент с запада представляется ограниченным. Основные потоки распространялись туда от Эфиопско-Афарского суперплюма с юга под Индийским океаном и Индийским микроконтинентом [Соколов, Трифонов, 2012].

Менее контрастны границы между сегментами пояса внутри Анатолийско-Кавказско-Иранского мегасегмента, причём местами эти границы отличаются от тех, которые выделены по геолого-геофизическим данным о новейшей структуре земной коры. Так, строение верхней мантии под Лутским массивом обнаруживает сходство с Афгано-Таджикским, а не Ирано-Каспийским сегментом, как следовало бы из геологических данных. Севернее Трансформы Мёртвого моря, которая на юге является западной границей Аравийско-Кавказского сегмента как на коровом, так и на мантийном уровнях, эта граница на подлитосферном уровне разделяет насыщенную потоками верхнюю мантию Восточной Анатолии и более высокоскоростную верхнюю мантию Западной Анатолии. Севернее граница следует вдоль юго-западного подножья вала Андрусова-Архангельского, где отмечена возрастанием к западу мощности литосферы. Далее граница проявляется в Добрудже, где примерно под зоной Вранча на глубинах 400–750 км находится восточное окончание высокоскоростного объёма, который обнаружен под Карпатской дугой и Паннонской впадиной и, возможно, отражает положение раннеальпийского слэба, частично разрушенного подлитосферным потоком. Севернее граница смыкается с линией Тейсейра-Торнквиста. Такое положение западной границы Аравийско-Кавказского сегмента указывает на единство его тектонических зон, в частности, в пределах Горного Крыма и Большого Кавказа.

3. *Трифонов В.Г., Соколов С.Ю., Соколов С.А., Хессами Х. Мезозойско-кайнозойская структура Черноморско-Крымско-Кавказско-Каспийского региона и её соотношения со строением верхней мантии* // Геотектоника. 2020 (в печати). Развиваются положения, обоснованные в предыдущей статье, главным образом, в части анализа и обобщения геологических данных о тектоническом развитии земной коры северных частей Аравийско-Кавказского и Ирано-Каспийского сегментов АГП с позднего триаса до неогена. Уточняются соотношения коровых структур со строением верхней мантии.

Рассматривается регион от Крыма, Восточного Черноморья и Восточного Понта на западе до Среднего и Южного Каспия и Эльбурса на востоке. На основе анализа данных по геологии региона охарактеризованы его мезозойско-кайнозойская тектоническая зональность и ее эволюция. В ранней юре к югу от рассматриваемого региона находился океан Мезотетис, северный субдуцировавший край которого маркируется сейчас сутурой Измир–Анкара–Эрзинджан, главной восточной ветвью которой является Севано-Акеринская сутура и ее гипотетическое восточное продолжение вдоль южных подножий Эльбурса. К северу от океана Мезотетис располагались: (1) эпигерцинская подвижная область; (2) Мезийско-Черноморско-Закавказская малая плита с докембрийско-байкальским фундаментом, который в Закавказье подвергся герцинской тектоно-магматической

переработке; (3) относительно глубоководный Крымско-Кавказско-Южнокаспийский прогиб на континентальной коре, утонявшейся по мере ее растяжения; (4) край Скифской плиты с маломощными осадками. На Кавказе выделяются южный и северный склоны прогиба 3, где накопились мощные шельфовые отложения. С началом субдукции в байосе на северном краю Мезотетиса зоны 1, 2 и южный склон прогиба 3 стали ареной островодужного вулканизма, который в зоне 1 продолжался в мелу. Область островодужного вулканизма наследовал эоценовый коллизионный вулканический пояс.

Крымская часть прогиба 3 и его северный склон на Кавказе испытали киммерийские деформации, после которых до начала миоцена там накапливались шельфовые фации, тогда как в кавказско-южнокаспийской части зоны 3 продолжалось относительно глубоководное осадконакопление. В позднем мелу, палеогене и миоцене в зоне 2 возникли и развивались Западно-Черноморская и Восточно-Черноморская впадины растяжения, заполнявшиеся морскими отложениями на утонявшейся континентальной коре. В плиоцен-четвертичное время в Черном море происходило общее прогибание и недифференцированное осадконакопление. Тогда же усилилось прогибание Южного Каспия, Азово-Кубанского и Терско-Дербентского прогибов. В горных частях региона в среднем и позднем миоцене имели место многофазные разломно-складчатые деформации, которые привели к образованию дифференцированных субаэральных (а в Южном Каспии также подводных) поднятий. Они дополнились общим плиоцен-четвертичным воздыманием и формированием современных горных сооружений.

Отметим, что Мезийско-Черноморско-Закавказская малая плита, играющая важную роль в строении и эволюции Аравийско-Кавказского сегмента АГП, на границе с Ирано-Каспийским сегментом вырождается и в его пределах представлена лишь несколькими небольшими фрагментами домезозойского фундамента в надвиговых зонах.

Сравнение возникших коровых структур со скоростными неоднородностями верхней мантии, выявленными путем анализа сейсмотомографических данных глобальной сети, показывает, что многие неоднородности стерты подлитосферными «горячими» потоками, распространявшимися от Эфиопско-Афарского суперплюма. В тех местах, где интенсивность потоков ослабевала, сохранились реликты субдуцированных слэбов Неотетиса в Загросе, Мезотетиса в районе с. Саатлы (Азербайджан) и литосферы Скифской плиты, пододвинутой под Центральный Кавказ в ходе герцинской субдукции. Более слабый след герцинского слэба обнаружен под Степным Крымом.

Сохранность до наших дней реликтов герцинского слэба под Центральным Кавказом представляется уникальной. Геологические данные свидетельствуют о существовании зоны субдукции, по которой литосфера палеозойского океана могла погружаться на юг под край Гондваны, которой принадлежал Большой Кавказ [Сомин, 2007]. Возможно, центрально-кавказский край Гондваны характеризовался зрелой континентальной корой, и субдуцированный слэб содержал фрагменты континентальной коры. Связанные с этим структурно-вещественные преобразования на стадии коллизии могли стать причиной метаморфизма пород Главного хребта во второй половине карбона. Признаки подобного пододвигания, хотя и более слабые, обнаружены по сейсмотомографическим данным под Степным Крымом, где выделена наклоненная на юг Северо-Крымская палеозойская сутура [Юдин, 2011]. Таким образом, намечается сходство глубинного строения под Центральным Кавказом и Крымом и их отличие от Керченско-Таманской области и Северо-Западного Кавказа. Здесь аллохтонный клин над зоной субдукции мог иметь более океаническое строение, и потому геофизические отличия слэба от соседней мантии были менее контрастными и стерлись со временем. Возможно, те же особенности были присущи Восточному Кавказу, где признаки слэба гипотетичны. Возникшая в герцинское время концентрация коровых по своему происхождению метаморфических пород под Центральным Кавказом и Крымом обусловила в киммерийскую тектоническую эпоху их интенсивные деформации и аномальное поднятие Центрального Кавказа, приведшее к выходу на поверхность палеозойского фундамента.

Изложенные в статьях 2 и 3 результаты отражают взаимосвязь тектонических процессов в литосфере и подлитосферной верхней мантии и глубинную природу сегментации Альпийско-Гималайского пояса.

Публикация 4 характеризует проявления поперечной сегментации отдельной тектонической зоны.

4. Трихунков Я.И., Бачманов Д.М., Гайдаленок О.В., Маринин А.В., Соколов С.А. Новейшее горообразование в зоне сочленения структур Северо-Западного Кавказа и Керченско-Таманской области // Геотектоника. 2019. № 4. С. 78–99. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019378-96>

Проанализированы данные о строении и структурообразующей роли Анапо-Джигинской и впервые выделяемой в статье Абрауской субмеридиональных флексурно-разломных зон, рассекающих Северо-Западный Кавказ и Керченско-Таманскую складчатую область, ограничивая с востока ее самый молодой по возрасту складчатости Таманский сегмент. Показано, что обе зоны, проявившиеся на плиоцен-четвертичной стадии развития региона, характеризуются сбросовым опусканием западных крыльев и, вместе с тем, чертами зоны сдвиговых деформаций, указывающими на присутствие правосдвиговой компоненты смещений.

Результаты исследований, представленные в указанных публикациях, раскрывают разноуровневую поперечную сегментацию центральной части АГП: ее разделение на два мегасегмента, Памиро-Тибет-Гималайский и Анатолийско-Кавказско-Иранский; разделение последнего на несколько сегментов с Аравийско-Кавказским сегментом в центре; проявления локальной сегментации в его отдельных тектонических зонах. Первые два уровня сегментации находят отражение в верхней мантии, причем границы сегментов на мантийном уровне местами отличаются от их коровых границ. Сегментация внутри отдельных тектонических зон, вероятно, не выходит за пределы литосферы.

#### **Литература (кроме указанных выше публикаций 2017–2019 гг. по данному проекту):**

Саатлинская сверхглубокая (СГ–1) / под ред. А. Ализаде и В.Е. Хаина. Баку: Нафта-Пресс, 2000. 288 с.

Соколов С.Ю., Трифонов В.Г. Роль астеносферы в перемещении и деформации литосферы (Эфиопско-Афарский суперплюм и Альпийско-Гималайский пояс) // Геотектоника. 2012. № 3. С. 3–17.

Сомин М.Л. Главные черты строения доальпийского основания Большого Кавказа // Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Под ред. Ю.Г. Леонова. М.: ГЕОС, 2007. С. 15–38.

Юдин В.В. Геодинамика Крыма. Симферополь: Диайпи, 2011. 335 с.

Li C., van der Hilst R.D., Engdahl E.R., Burdick S. A new global model for P wave speed variations in Earth's mantle // *Geochemistry Geophysics Geosystems* G3. 2008. Vol. 9, N. 5. P. 1–21; doi:10.1029/2007GC001806

#### **Сопоставление результатов, полученных при реализации с мировым уровнем:**

Проблемы, затронутые в исследованиях по Проекту, входят в число важных проблем мировой геотектоники и геодинамики. Предложенная в книге [Трифонов, 2017] модель подлитосферных верхнемантийных течений удовлетворительно объясняет не только охватываемые плейт-тектонической теорией результаты взаимодействия плит и блоков литосферы, но также аномально быстрое и значительное поднятие новейших подвижных поясов в плиоцен-четвертичное время. Столь детальное, как в работах [Трифонов, Соколов, 2018; Трифонов и др., 2020], сопоставление сейсмотомографических данных о строении верхней мантии и геолого-геофизических данных о строении земной коры выполнено впервые и открывает новые аспекты взаимодействия этих геосфер. Особенно интересным представляется обнаружение следов позднепалеозойского пододвигания литосферы Скифской плиты под литосферу Центрального Кавказа и Крыма. Межрегиональное значение имеют определение признаков межгорных впадин Армении, обусловленных смещениями по разломам и связанных с мантийными преобразованиями, проявленными вулканизмом [Трифонов и др., 2017], а также проявлений поперечной сегментации в Керченско-Таманской складчатой области [Трихунков и др., 2019].



## **Методы и подходы, использованные при реализации Проекта:**

В ходе проведения полевых работ, обработки полевых материалов и датирования новейших геологических образований использовался широкий комплекс методов: структурно-геологический (включая тектонофизический в необходимых случаях), структурно-геоморфологический, литолого-фациальный, палеонтологические (включая палинологию и определения разных групп макро-организмов: моллюсков, мелких и крупных млекопитающих), магнито-стратиграфический и изотопно-геохронологический. Надежность результатов обеспечивалась сопоставлением данных, полученных с применением разных методов. Особое место занимает исследование соотношений структуры земной коры, определяемой по данным геологических наблюдений с привлечением опубликованных данных сейсмического зондирования и гравиметрии, и строения верхней мантии в терминах скоростей сейсмических волн. Строение верхней мантии определялось путем анализа сейсмотомографических данных мировой сети построением частой сети разрезов разного направления, демонстрирующих отклонения скоростей сейсмических волн от среднего значения первого приближения, заданные в процентах. Для построения разрезов в произвольных, заданных авторами направлениях использовалась оригинальная, разработанная С.Ю. Соколовым (исполнителем Проекта) программа. Построение столь частой сети профилей, по существу, обеспечивших создание трехмерной модели верхней мантии, использовалось для указанных целей авторами Проекта впервые.

## **Апробация результатов реализации Проекта на научных мероприятиях:**

Международная конференция INQUA-SEQS “Quaternary stratigraphy and hominids around Europe: Tautavel (Eastern Pyrenees)”, Тутавель, Франция, 10–15.09.2017 г.: Трихунков Я.И. Устный доклад: Trikhunkov Y.I., Trifonov V.G., Latyshev A.V., Shalaeva E.A., Bachmanov D.M., Kozhurin A.I. «Using of paleomagnetic data for correlation of the Pliocene-Quaternary sequences of Arabian-Caucasus region».

50-е Тектоническое совещание «Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии», Москва, 30.01–03.02.2018: Трифонов В.Г. Устный доклад: Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. «Тектоническое значение геодинамических процессов в ядре и мантии Земли».

50-е Тектоническое совещание «Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии», Москва, 30.01–03.02.2018: Трихунков Я.И. Устный доклад: Трихунков Я.И., Бачманов Д.М., Гайдалёнок О.В. «Новейшие тектонические структуры зоны сочленения Северо-Западного Кавказа и Керченско-Таманской области»

Международная конференция “30 years after the Spitak earthquake: experience and perspectives” («30 лет после Спитакского землетрясения: уроки и перспективы»), Ереван, Армения, 03–07.12.2018: Трифонов В.Г. Устный доклад: Trifonov, V.G., Simakova, A.N., Çelik, H., Trikhunkov, Ya.I., Shalaeva, E.A., Frolov, P.D., Aleksandrova, G.N., Zelenin, E.A., Tesakov, A.S., Bachmanov, D.M., Latyshev, A.V., and Sokolov, S.A. «Marine Akchaghylian deposits of Caspian type in the western Shirak Basin and intensive Quaternary uplift in Armenian Highland». (Трифонов В.Г., Симакова А.Н., Челик Х., Трихунков Я.И., Шалаева Е.А., Фролов П.Д., Александрова Г.Н., Зеленин Е.А., Тесаков А.С., Бачманов Д.М., Латышев А.В., Соколов С.А. «Морские акчагыльские отложения каспийского типа на западе Ширакской впадины и интенсивное четвертичное поднятие Армянского нагорья»).

51-е Тектоническое совещание «Проблемы тектоники континентов и океанов», Москва, 30.01–02.02.2019. Трифонов В.Г. Устный доклад: Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. «Отражение тектонической зональности и сегментации центральной части Альпийско-Гималайского пояса в структуре верхней мантии».

Ленинские чтения МПГУ, Географический ф-т, Москва, 11.03.2019. Трихунков Я.И. Устный доклад: Трихунков Я.И. «Новый подход к классификации эндогенного рельефа».

Всероссийская научная конференция «Прикладные аспекты динамической геологии», посвященная 110-й годовщине со дня рождения Г.П. Горшкова, Геологический факультет МГУ, Москва, 2019. Гайдалёнок О.В. Устный доклад: Гайдалёнок О.В., Соколов С.А., Фролов П.Д. «Позднекайнозойская складчатость Керченско-Таманской области»

### **Адреса ресурсов в Интернете, подготовленных Проекту:**

Параллельно с исследованиями по данному Проекту РФФИ проводилась и была завершена в рамках проекта РФ работа по созданию Новой базы данных об активных разломах Евразии. В эту базу данных вошли все сведения об активных разломах, полученные в ходе выполнения данного проекта. База данных доступна на сайте Геологического института РАН <http://ginras.ru/> в разделе лаборатории неотектоники и современной геодинамики <http://neotec.ginras.ru/> на странице <http://neotec.ginras.ru/database.html>, где она снабжена Объяснительной запиской и списком использованной литературы.

### **Библиографический список всех публикаций по Проекту:**

Трихунков Ярослав Игоревич, Бачманов Дмитрий Михайлович, Гайдоленок Ольга Владимировна, Маринин Антон Владимирович, Соколов Сергей Александрович. Новейшее горообразование в зоне сочленения структур Северо-Западного Кавказа и Керченско-Таманской области. Геотектоника, 2019, 4, 78-99, IPF 1.104

Трифонов Владимир Георгиевич, Соколов Сергей Юрьевич. Отражение тектонической зональности и сегментации центральной части Альпийско-Гималайского пояса в структуре верхней мантии. 2019, 2

Трифонов Владимир Георгиевич. Неотектоника подвижных поясов. Труды Геологического института, 2017, 614

Трифонов Владимир Георгиевич, Соколов Сергей Юрьевич. Строение мантии и тектоническая зональность центральной части Альпийско-Гималайского пояса. Геодинамика и тектонофизика, 2018, 9 - 4, 1127–1145