## МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М .В . ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

#### Чэнь Чжидань

## НЕОТЕКТОНИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ГОР ЦИЛИАН И ЕЁ СВЯЗЬ С ГЕОДИНАМИКОЙ ТИБЕТСКОГО НАГОРЬЯ

Специальность 1.6.1 – Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика

#### АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Диссертация подготовлена на кафедре динамической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

#### Научные руководители

Короновский Николай Владимирович

доктор геолого-минералогических наук, профессор

Зайцев Владимир Александрович

кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Официальные оппоненты

Макеев Владимир Михайлович — доктор геологоминералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева» Российской академии наук, и.о. заведующего лабораторией эндогенной геодинамики и неотектоники, главный научный сотрудник

Корженков Андрей Михайлович — доктор геолого -минералогических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта» Российской академии наук, и.о. заведующего лабораторией палеосейсмологии и палеогеодинамики, главный научный сотрудник

Полещук Антон Владимирович — кандидат геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Геологический институт» Российской академии наук, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится 24 ноября 2023 года в 14:30 на заседании диссертационного совета МГУ.016.7 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологическии факультет, ауд. 415.

E-mail: nvbadulina@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертацией научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломонововский проспект, д. 27) и на портале https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.7/2705

Авторефарат разослан октября 2023 года

Ученый секретарь диссертационного совета МГУ .016.7, кандидат геолого-минералогических наук

Ю.А. Гатовский

#### І. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы работы. Образование Тибетского нагорья, вызванное коллизией Индостана с Евразией, является одним из важнейших геологических событий на Земле в кайнозойскую эру [Yin et al., 2000; Royden et al., 2008]. Непрерывное сжатие между континентами в кайнозое вызвало поднятие и сильную тектоническую деформацию на территории Тибета [Molnar и Тарроппіег, 1975, 1977]. Горы Цилиан, расположенные на северо-востоке Тибетского нагорья, считаются новообразованной орогенной зоной в связи с расширением нагорья на севере. Они поглощают 15%–20% сокращения земной коры Тибетского нагорья [Zhang et al., 2004], но их способ сокращения земной коры остаётся неясным. Были предложены многие геодинамические модели для выявления деформации земной коры Тибетского нагорья в результате коллизии Индостана и Евразии [Yin et al., 2000; Wang et al., 1998, 2014; Буртман, 2012], но какая модель соответствует деформации гор Цилиан, до сих пор неясно. Таким образом, изучение неотектонической деформации гор Цилиан является чрезвычайно актуальным.

**Цель исследования** — выявление неотектонической деформации гор Цилиан и установление её связи с геодинамикой Тибетского нагорья.

#### Залачи:

- 1. Обобщить и выявить эволюцию тектонической деформации Тибетского нагорья на основании собственных исследований и ранее опубликованной литературы;
- 2. Провести комплекс предыдущих исследований для изучения состояния изученности неотектоники и поднятия гор Цилиан в позднем кайнозое;
- 3. Выявить неотектоническую деформацию гор Цилиан с помощью данных сейсмических каталогов, региональных активных разломов, GPS и структурной геоморфологии;
- 4. Установить связь между неотектонической деформацией гор Цилиан и геодинамикой Тибетского нагорья.

**Объектом исследования** в данной работе являются горы Цилиан (северо-восточная часть Тибетского нагорья), а **предметом исследования** — неотектоническая деформация гор Цилиан и её связь с геодинамикой Тибетского нагорья.

Фактический материал И методы исследования. Основными исходными материалами послужили цифровая модель рельефа с точностью до 30 метров (ЦМР или DEM), загруженная из Geospatial Data Cloud (www.gscloud.cn) и построенная по радарным данным ASTER; цифровая модель рельефа с разрешением до сантиметра, полученная с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА); данные активных разломов, полученные из «Центра обработки данных сейсмоактивных исследований разломов Китая» (www.activefaultdatacenter.cn/map); сейсмические каталоги, взятые из CEIC (China Earthquake Networks Center: www.ceic.ac.cn/history), GCMT (Global Centroid-Moment-Tensor project: www.globalcmt.org) и национального центра обработки данных о землетрясениях в Китае (data.earthquake.cn); данные GPS, взятые из проекта CMONOC (Crustal Movement Observation Network of China) [Zheng et al., 2017]; продольные профили рельефа и возраст речных террас [Liu et al., 2020; Chen et al., 2022].

При проведении исследования применен комплекс методов: структурногеоморфологический анализ рельефа [Hetzel, 2013]; четвертичные хронологические датирования образцов, включающие методы люминесцентного датирования (Luminescence dating) и космогенных радионуклидов (Cosmogenic nuclide dating 10Be) [Liu et al., 2020]. Осуществлялась интерпретация региональных сейсмических, структурных и геодезических данных [Zhang et al., 2013]. Применялся пространственный анализ рельефа на основе данных ЦМР в программе Arcgis и проводились полевые исследования в двух ключевых районах на севере гор Цилиан.

Достоверность полученных результатов. Применение комплексного подхода, подразумевающего использование различных апробированных методик, уточняющих и дополняющих друг друга и анализ разностороннего фактического материала — данных об активных разломах, космической геодезии, структурной геоморфологии, сейсмических и полевых материалов, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Личный вклад автора. Автором собраны данные по активным разломам и их скорости смещения, сейсмические каталоги и данные GPS для выявления неотектонической деформации гор Цилиан, осуществлены их интерпретация и анализ. Проведены полевые работы в бассейне реки Байян в западных горах Цилиан и в районе разлома Хайянь в восточных горах Цилиан. Выполнен геоморфологический анализ рельефа района исследования, построены продольные профили речных террас в западной части гор Цилиан, измерены перемещения и возраст террас. По этим данным определена скорость смещения по активным разломам в западных горах Цилиан. Построена высокоточная цифровая модель рельефа с разрешением до сантиметра и определена скорость смещения среднего участка разлома Хайянь в восточной части гор Цилиан. На основе комплексного анализа, полученных данных, автором предложена модель неотектонической деформации гор Цилиан и сопоставлена с моделью геодинамики Тибетского нагорья.

Научная новизна. Впервые выявлены характеристики неотектонической деформации гор Цилиан и показан способ деформации земной коры в этом районе по данным сейсмического каталога, региональных активных разломов и GPS. Впервые рассчитаны скорость смещения активных разломов в западной части гор Цилиан и вертикальная скорость смещения среднего участка разлома Хайянь в восточной части гор Цилиан. В работе предложена модель неотектонической деформации гор Цилиан и выявлена связь между неотектонической деформацией гор Цилиан и геодинамикой Тибетского нагорья.

**Теоретическая и практическая значимость.** В работе определена неотектоническая деформация гор Цилиан, что является важным для изучения тектонической эволюции и геодинамики Тибетского нагорья. Полученные данные о неотектонической деформации имеют большое значение для предотвращения землетрясений и стихийных бедствий в горах Цилиан.

#### Защищаемые положения.

- 1. Неотектонические движения гор Цилиан обусловлены деформацией сжатия в северовосточном направлении на западе гор и сдвиговой деформацией вдоль пограничных разломов на востоке по данным сейсмических материалов, GPS и результатов собственных геоморфологических исследований.
- 2. Вертикальные движения в бассейне реки Байян в западных горах Цилиан проявляются в виде взбросов. По данным измерений уровней речных террас и их возрастных

датировок скорости вертикальных смещений по этим взбросам, начиная с позднего неоплейстоцена, колеблются в пределах 0,3–0,7 мм/год.

- 3. Средняя часть разлома Хайянь на востоке гор Цилиан характеризована левосдвиговым смещением со сбросовой компонентой. По перемещению и возрастным датировкам террас скорость горизонтального смещения по разлому Хайянь с позднего неоплейстоцена составляет ~4 мм/год и вертикального смещения ~0,4 мм/год.
- 4. Скорости неотектонических деформаций гор Цилиан согласуются с данными о современных тектонических движениях, полученных с помощью GPS, что свидетельствует об их унаследованности.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 10 работ, основополагающий вклад в которых принадлежит соискателю: 5 статей в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных WoS, Scopus, BAK, RSCI и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ; 4 работы представлены в материалах совещаний и тезисах докладов на конференциях; 1 статья опубликована в основном китайском журнале.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав и заключения. Общий объем работы составляет 154 страницы, в том числе 57 рисунков, 5 таблиц и 2 приложения. Список литературных источников содержит 155 наименований.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своим научным руководителям Николаю Владимировичу Короновскому и Владимиру Александровичу Зайцеву за всестороннюю поддержку и помощь при написании работы. Автор очень признателен за помощь сотрудникам кафедры динамической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Отдельно благодарю проф. В.С. Захарова, доцента Л.В. Панину, н.с. Е.А. Мануилову, ст.преподавателя М.С. Мышенкову за помощь и ценные рекомендации, которые улучшили работу. Глубокую признательность автор выражает своим коллегам в Китае за сбор материалов и проведение измерений. Особую благодарность автор выражает всем членам своей семьи и друзьям за поддержку во время работы.

#### ІІ. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

#### Введение

Во введении сформулированы цели и задачи исследования, обоснована актуальность и значимость работы, приведены материалы и методы исследования, предложены основные результаты исследования, описаны научная новизна и личный вклад автора.

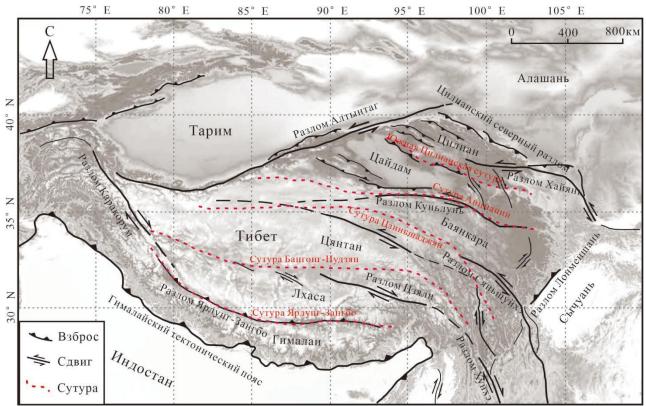
#### Глава 1. Краткие сведения о тектонике Тибетского нагорья в кайнозое

Тибетское нагорье представляет собой важную экспериментальную зону для изучения континентальных геодинамических процессов. В данной работе обобщаются предыдущие исследования с целью выявления тектонической деформации и эволюции гор Цилиан.

1.1. <u>Основные блоки Тибетского нагорья и их границы.</u> Тибетское нагорье состоит из шести блоков (с юга на север): Гималаи, Лхаса, Цянтан, Баянкара, Цайдам и Цилиан (рис. 1). Блоки ограничены крупными активными тектоническими зонами и сутурами (с юга на север):

Гималайская тектоническая зона, сутура Ярлунг-Зангбо, Бангонг-Нудзян, Цзиньшаджян, Анимацин, южная Цилианская сутура и северная Цилианская тектоническая зона (рис. 1) [Yin et al., 2000]. Среди них, блок Цилиан, расположенный на северо-востоке Тибета, является областью исследования этой работы.

<u>1.2. Коллизия Индостина с Евразией.</u> Данные по изучению палеомагнетизма, петрологии и седиментологии позволили установить, что столкновение между Индостаном и Евразией началось 65–60 млн. лет назад и древний океан Тетис между ними закончился около 40 млн. лет назад. Продолжительность данного процесса от его начала и до полного закрытия океана Тетис составляет 15–20 млн. лет [Yin et al., 2000; Mo et al., 2010; Ding et al., 2016, 2017].



**Рис. 1.** Схема геолого-географического районирования Тибетского нагорья [Yin et al., 2000 и Буртман, 2012 с дополнениями].

1.3. Поднятие Тибетского нагорья. Длительное сжатие между Индостаном и Евразией привело к интенсивному поднятию земной коры в Тибете. Поднятие Тибетского нагорья представляет собой процесс расширения от центра к периферии [Wang et al, 2014]. Центральное плато (в основном, включая блоки Лхаса и Цянтан) начало подниматься до эоцена и достигло наибольшей высоты в миоцене [Wang et al, 2014]. После позднего миоцена Тибетское нагорье расширялось к периферии нагорья, в результате чего сформировались многие периферийные горы, такие как Цилиан, Лунмэнь, Люпань, Гималаи и т. д [Gan et al, 2021].

<u>1.4. Тектоническая деформация Тибетского нагорья.</u> 1.4.1. Движение земной коры Тибетского нагорья. Согласно данным GPS скорость сокращения земной коры Тибетского нагорья составляет 36–40 мм/год [Zhang et al., 2004]. Горы Цилиан на севере и Гималаи на юге Тибетского нагорья в основном поглощают сокращение земной коры посредством деформации сжатия в долготном направлении. Центральная часть Тибетского нагорья, включающая блоки

Лхаса, Цянтан и Баянкара, в основном поглощает сокращение земной коры по удлинению земной коры в широтном направлении.

- <u>1.4.2. Активные разломы в Тибете и их кинематика.</u> Взбросы в основном расположены на севере Тибетского нагорья горы Цилиан, на юге Гималаи и на востоке горы Лунмэньшань (рис. 1). Сбросы в основном расположены в центральной части Тибетского нагорья. Сдвиги распространены по всей территории Тибетского нагорья (с юга на север): Ярлунг-Зангбо, Джяли-Хунхэ, Сяньшуйхэ, Куньлунь, Алтынтаг и Хайянь (рис. 1) [Yin et al., 2000; Тарроппіет et al., 2001]. Эти сдвиги компенсировались относительным движением блоков в Тибете.
- 1.5. Динамические модели деформации земной коры Тибетского нагорья. В работах [Буртман, 2010; Wang et al., 2014] предложены различные динамические модели для объяснения деформации земной коры Тибетского нагорья. Для объяснения мощной земной коры Тибетского нагорья предложены модели двойной коры [Argand, 1924] и увеличения мощности земной коры [Bird, 1979; Dewey, 1973]. Для объяснения движения центральных блоков в Тибете была разработана модель бокового движения земной коры [Тарроппіег и Моlnar, 1975, 1976, 1977]. Модель литосферно-мантийной конвекции [Molnar et al., 1993] описывает поднятие и расширение Тибетского нагорья в позднем миоцене. Модель потока нижней земной коры [Royden et al., 1997, 2008] была предложена для объяснения деформации земной коры Тибетского нагорья.
- <u>1.6. Выводы.</u> Тибетское нагорье образовалось в резутьтате коллизии Индийской и Евразийской плит. Это нагорье в основном состоит из шести блоков с юга на север. Время начала коллизии плит 65–60 млн. лет назад, а полное закрытие древнего океана Тетис между ними в 45–40 млн. лет. После позднего миоцена Тибетское нагорье расширялось от центра к периферии нагорья. Южная и северная части нагорья характеризуются деформацией сжатия, в центре нагорья развиты сбросы и грабены, и по всей территории Тибета существуют несколько крупномасштабных сдвиговых разломов. Рассмотрены геодинамические модели для объяснения деформации земной коры Тибетского нагорья.

#### Глава 2. Кайнозойское поднятие и состояние изученности неотектоники гор Цилиан

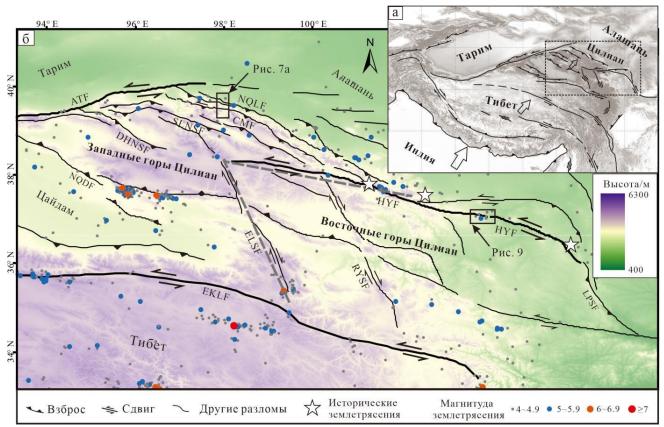
- <u>2.1. Общие сведения о горах Цилиан.</u> Горы Цилиан расположены на северо-востоке Тибета. На западе они граничат с бассейном Тарим, а на севере с блоком Алашань. Их длина составляет 1000 км в широтном направлении и ширина 200 км в меридиональном направлении, средняя высота около 4000 м над уровнем моря.
- 2.2. Геологическое строение гор Цилиан. Кристаллический фундамент гор Цилиан представлен метаморфическими породами нижнего протерозоя и метаморфическими осадочными отложениями среднего и верхнего протерозоя. Палеозойские и мезозойские породы в основном распространены в горных хребтах Цилиан, кайнозойские пласты в бассейнах гор Цилиан. Изучение осадочных отложений в кайнозойских бассейнах позволяет описать процесс поднятия гор Цилиан в кайнозое.
- <u>2.3. Кайнозойские отложения в бассейнах гор Цилиан. 2.3.1. Кайнозойские отложения</u> на севере гор Цилиан. В бассейне Цзюси на севере гор Цилиан получены два

стратиграфических разреза: Лаоцзюньмао и Цаогоу [Zheng et al., 2017; Wang et al., 2016]. В разрезе Лаоцзюньмао установлено, что скорость осадконакопления в кайнозое увеличилась примерно с 8 млн. лет назад и изменилась от 13,6 см / тыс. лет до 27 см / тыс. лет. В разрезе Цаогоу скорость осадконакопления увеличилась примерно 14—12 млн. лет назад. Эти результаты свидетельствуют о том, что северные горы Цилиан начали подниматься в период 14—8 млн. лет назад.

- <u>2.3.2 Кайнозойские отложения на юге гор Цилиан.</u> Разрез Хунгоу расположен в бассейне Цайдам на юге гор Цилиан. Скорость осадконакопления в разрезе Хунгоу значительно увеличилась примерно 14—12 млн. лет и изменилась от 14,4 см / тыс. лет до 37,7 см / тыс. лет [Wang et al., 2017]. Изменения скорости осадконакопления показывают, что горы Цилиан вероятно испытали интенсивный подъем в интервале 14—12 млн. лет назад.
- 2.4. Поднятие гор Цилиан в кайнозое. Существует две точки зрения о времени поднятия гор Цилиан в кайнозое [Jolivet et al., 2001; Pan et al., 2013]. Согласно одной из них поднятие гор Цилиан началось одновременно со столкновением Индийской и Евразийской литосферных плит (в позднем мелу-эоцене) [Pan et al., 2013; Li et al., 2013; Qi et al., 2016]. Другая точка зрения говорит о том, что горы Цилиан начали подниматься в миоцене, позднее времени столкновении двух плит [Jolivet et al., 2001; Wan et al., 2010; Zheng et al., 2010; Zheng et al., 2017].
- <u>2.4.1. Время начала поднятия гор Цилиан.</u> Основываясь на исследовании отложений в кайнозойских бассейнах установлено, что горы Цилиан начали подниматься в среднем-позднем миоцене. Большинство свидетельств [Wang et al., 2016, 2017; Zheng et al., 2017] подтверждают мнение о том, что горы Цилиан начали подниматься в среднем-позднем миоцене (14–8 млн. лет назад), позднее времени коллизии Индостана с Евразией (60–40 млн. лет назад).
- 2.4.2. Процесс поднятия гор Цилиан. Данные по седиментологии, низкотемпературной термохронологии показывают, что горы Цилиан постепенно поднимались с юга на север. С помощью трекового анализа апатита выявлено, что южные горы Цилиан начали подниматься первыми в интервале 25–17 млн. лет назад, центральные 16–14 млн. лет назад, северные 10–8 млн. лет назад. Последняя складчато-разломная зона, расположенная в предгорьях северного края гор Цилиан начала подниматься 4–3 млн. лет назад [Zheng et al., 2010, 2017; Wan et al., 2010].
- 2.5. Современное состояние изученности неотектонической деформации гор Цилиан. 2.5.1. Деформации земной коры гор Цилиан. Хотя горы Цилиан находятся более чем в 1000 км от границы между Индийской и Евразийской плитами, в этом районе наблюдаются сильные тектонические деформации и активная сейсмичность (рис. 2). В горах Цилиан развивается ряд активных разломов и горных хребтов, простирающихся в западно-северо-западном направлении (рис. 2), ориентированных почти перпендикулярно к направлению столкновения Индостана и Евразии, что указывает на то, что это столкновение привело к значительному сокращению земной коры и деформации сжатия в горах Цилиан [Zhang et al., 2004; Chen et al., 2022]. Согласно данным GPS, современная скорость сокращения земной коры гор Цилиан составляет  $5,5\pm1,5\,$  мм / год, которая поглощается крупными зонами разломов и складок, расположенных на краю и внутри гор Цилиан [Zhang et al., 2004].

- 2.5.2. Активные разломы в районе гор Цилиан. С востока и запада горы Цилиан ограничены левосторонними сдвигами Алтынтаг и Хайянь (рис. 2) [Zheng et al., 2013]. Внутри гор Цилиан существует две группы разломов. Одна группа это разломы западно-северозападного простирания, которые включают множество взбросовых дислокаций в горах Цилиан (рис. 2) [Chen et al., 2022]. Другая группа это сдвиговые разломы северо-северо-западного простирания, которые расположены под определенным углом к взбросам (рис. 2) [Li et al., 2018; Chen et al., 2022]. Позднечетвертичные и современные скорости смещения по этим разломам были получены геоморфологическими и геодезическими методами [Xu et al., 2003; Zhang et al., 2004; Chen et al., 2022].
- 2.5.3. Две модели, отражающие деформацию земной коры гор Цилиан. Были предложены две модели для выявления сокращения земной коры Тибетского нагорья в результате столкновения Индостана и Евразии. "Модель утолщения земной коры" предполагает [Molnar et al, 1975; Houseman and England, 1993], что сокращение земной коры реализуется в виде равномерного утолщения и сжатия [Zhang et al., 2004], а согласно "модели экструзии земной коры" [Тарроппіет et al, 1976, 1977] сокращение земной коры в значительной степени компенсируется удлинением земной коры в широтном направлении [Zhang et al., 2004; Liu et al., 2022].

<u>2.6. Выводы.</u> Горы Цилиан начали подниматься в среднем и позднем миоцене (14–8 млн. лет), что намного позже, чем время начала столкновения Индостана с Евразией (65–60 млн. лет). Несмотря на то, что горы Цилиан находятся далеко от границы плит между Индостаном и Евразией, они подверглись сильной деформации сжатия. Существование сдвиговых разломов свидетельствует о том, что в этой области также имеется сдвиговая деформация.



**Рис. 2.** Тектоническая карта гор Цилиан. (а) Схема Тибетского нагорья; (б) Тектоническая карта гор Цилиан, показывающая активные разломы и землетрясения. Активные разломы:

ATF — Алтынтаг; CMF — Чанма; DHNSF — Данхэнаньшань; EKLF — восточный Куньлуньский; ELSF — Елашань; HYF — Хайянь; LPSF — Люпаньшань; NQDF — северный Цилианский; NQLF — северный Цайдамский; RYSF — Риюешань; SLNSF — Шуленаньшань.

#### Глава 3. Методы и материалы исследования

- <u>3.1. Интерпретация сейсмических, структурных и геодезических данных.</u> В работе собраны исторические сейсмические каталоги с магнитудами выше трех в горах Цилиан с 2009 по 2021 год (data.earthquake.cn), региональные активные разломы (www.activefault-datacenter.cn/map), и данные GPS, взятые из проекта CMONOC (Crustal Movement Observation Network of China). Также проведена интерпретация сейсмических и структурных данных для выявления характеристик деформации земной коры горы Цилиан, а затем определены интенсивность деформации и скорость движения земной коры по данным GPS [Zhang et al., 2013].
- <u>3.2. Полевые исследования в двух ключевых районах.</u> Чтобы проверить и оценить характеристики неотектонической деформации гор Цилиан, были проведены полевые исследования в двух важных районах на территории исследования: в бассейне реки Байян на западе гор Цилиан и в районе средней части разлома Хайянь на востоке гор Цилиан, которые могут отражать характеристики региональных неотектонических деформаций. В результате полевых работ определены местоположение активных разломов, основные их параметры, амплитуды и скорости смещения по разломам.
- <u>3.3. Структурно-геоморфологический анализ рельефа.</u> Геоморфологические особенности речных долин являются эффективными показателями для изучения неотектонической деформации по активным зонам разломов [Hetzel, 2013]. Основываясь на деформации речных террас, в данной работе определяются характеристики основных активных разломов района исследования. Также проведены высокоточные геоморфологические измерения и получены значения перемещений террас вблизи разломов с помощью GPS и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).
- <u>3.4. Определение возраста речных террас.</u> В работе для определения возраста террас применены два метода: люминесцентное датирование (Luminescence dating) и космологическое нуклидное датирование (Cosmogenic nuclide dating, <sup>10</sup>Be) [Liu et al., 2020]. Данные о возрасте речных террас в сочетании со значениями изменения их уровней используются для определения скорости смещения по разломам в позднем неоплейстоцене голоцене.

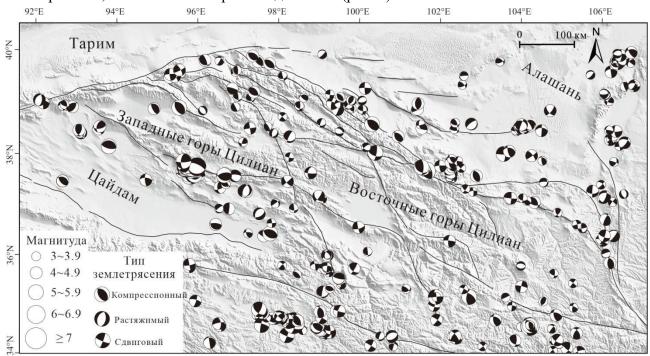
#### Глава 4. Сейсмичность, активные разломы и поле скоростей GPS гор Цилиан

Горы Цилиан расположены на северо-востоке Тибета далеко от границы между Индийской и Евразийской плитами, но на этой территории произошли сильные тектонические деформации и имеется активная сейсмичность (рис. 2). С целью выявления неотектонической деформации гор Цилиан в данной работе собраны материалы по активным разломам, сейсмическим и GPS данным.

<u>4.1. Геоморфология гор Цилиан.</u> В ходе работы построена карта склонов гор Цилиан на основе данных цифровой модели рельефа (DEM) с точностью до 30 м. Наиболее типичной геоморфологической особенностью являются линейность горных хребтов, ориентированных в

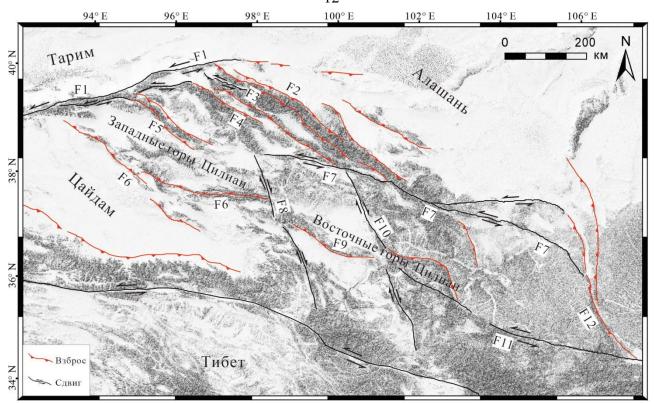
западно-северо-западном направлении (рис. 2). Это указывает на то, что поднятие гор Цилиан обусловлено сокращением земной коры, вызванным столкновением плит. Большинство линейных горных хребтов развито, в основном, в западной части гор Цилиан. В соответствии с региональным рельефом и тектоническими характеристиками, горы Цилиан разделены на две части: восточную и западную (рис. 2).

4.2. Сейсмическая активность в районе гор Цилиан. В работе собраны сейсмические данные магнитудой от 3 баллов и выше за период с 2009 по 2021 гг., взятые из национального центра обработки данных о землетрясениях в Китае [data.earthquake.cn]. По этим данным построены решения механизмов очагов землетрясений в программе GMT (рис. 3) [www.globalcmt.org]. Характеристики сейсмической активности гор Цилиан отражены в двух аспектах. Прежде всего, количество землетрясений в западных горах Цилиан гораздо выше, чем в восточных горах. Во-вторых, в западных горах Цилиан преобладают компрессионные землетрясения, а в восточных горах — сдвиговые (рис. 3).



**Рис. 3.** Карта эпицентров землетрясений и решения механизмов очагов землетрясений в горах Цилиан. Сейсмические данные взяты из национального центра обработки данных о землетрясениях в Китае [data.earthquake.cn]. Решения механизмов очагов землетрясений построены в программе GMT [www.globalcmt.org].

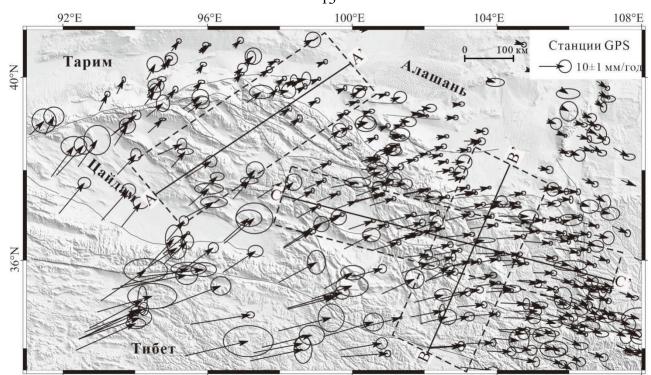
4.3. Распределение активных разломов в горах Цилиан. Согласно данным об активных разломах в районе гор Цилиан, большинство взбросов находится в западных горах Цилиан (рис. 4), включая северный Цилианский, Чанма, Шуленаньшань, Данхэнаньшань, северный Цайдамский. Взбросовая активность указывает на то, что в западных горах Цилиан, в основном, проявляется деформация сжатия, что согласуется с сейсмическими данными. В отличие от широко распространенных взбросов в западных горах Цилиан, в восточных существует ряд крупных сдвиговых разломов (рис. 4). Эти сдвиговые разломы также являются основными структурами, к которым приурочены землетрясения в районе восточных гор Цилиан.



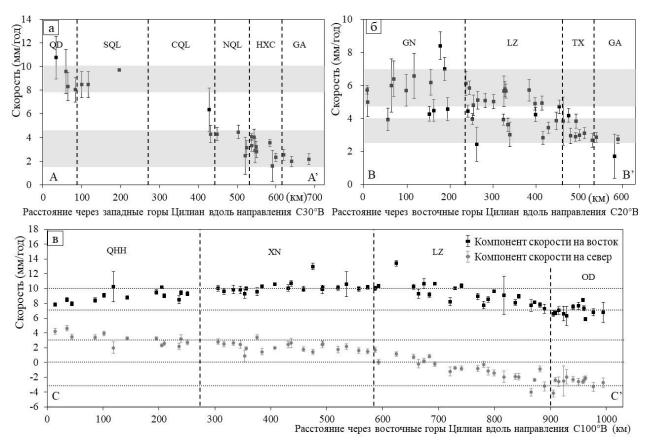
**Рис. 4.** Карта распределения активных разломов в горах Цилиан. F1 — разлом Алтынтаг; F2 — северный Цилианский разлом; F3 — разлом Чанма; F4 — разлом Шуленаньшань; F5 — разлом Данхэнаньшань; F6 — северный Цайдамский разлом; F7 — разлом Хайянь; F8 — разлом Елашань; F9 — разлом Цинхай-Наньшань; F10 — разлом Риюешань; F11 — разлом Сицинлин; F12 — разлом Люпаньшань [www.activefault-datacenter.cn/map].

4.4. Поле скоростей движений земной коры гор Цилиан по данным GPS. Данные GPS позволили выявить современные движения земной коры гор Цилиан. Согласно данным GPS для западных гор Цилиан выявлено сокращение земной коры в северо-северо-восточном направлении, для восточных гор отмечается движение земной коры на восток с вращением по часовой стрелке (рис. 5). В пределах гор Цилиан установлены три GPS профиля, которые указывают на то, что скорость сокращения земной коры западных гор Цилиан составляет 5–7 мм/год, а скорость сокращения восточных гор Цилиан — 2–3 мм/год. Скорость движения земной коры восточных гор Цилиан на восток составляет 5–7 мм/год (рис. 6).

<u>4.5. Выводы.</u> По данным сейсмических материалов, активных разломов и GPS неотектоническая деформация гор Цилиан проявляется в деформации сжатия в северовосточном направлении в западных горах Цилиан и сдвиговой деформации вдоль пограничных разломов в восточных горах Цилиан. Скорость сокращения земной коры в западных горах Цилиан составляет 5–7 мм/год, а скорость сокращения в восточных горах Цилиан — 2–3 мм/год. Скорость движения земной коры в восточных горах Цилиан на восток составляет 5–7 мм/год.



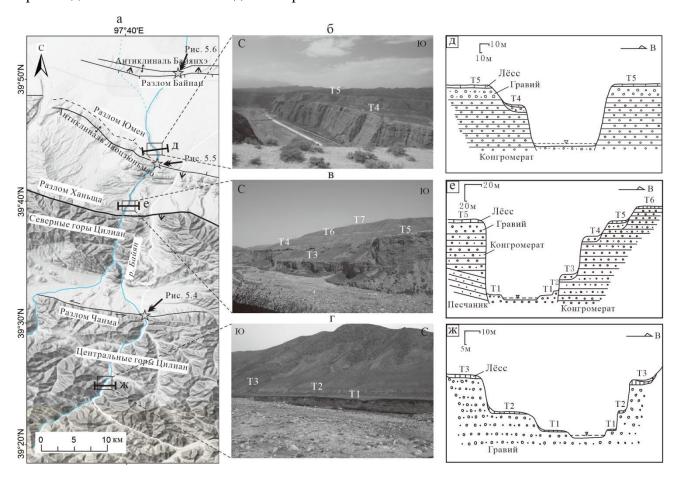
**Рис. 5.** Карта поля скоростей движения земной коры гор Цилиан по данным GPS, взятым из проекта CMONOC (Crustal Movement Observation Network of China).



**Рис. 6.** Три GPS профиля через горы Цилиан. Положение профилей показано на рис. 5. Профили A-A' и B-B' показывают скорость сокращения земной коры западных и восточных гор Цилиан. Профиль C-C' показывает скорость движения земной коры в восточных горах Цилиан на восток и вращение блоков по часовой стрелке.

# Глава 5. Позднечетвертичная тектоническая деформации по активным разломам в западных горах Цилиан

- <u>5.1. Тектоническая обстановка западных гор Цилиан.</u> Западные горы Цилиан состоят из ряда горных хребтов и бассейнов север-северо-западного простирания (рис. 2). В предгорьях распространены взбросы и складки. Активными взбросами с юга на север являются северный Цайдамский разлом, разлом Данхэнаньшань, Шуленаньшань, Чанма и северный Цилианский разлом (рис. 2). Для выявления неотектонической деформации западных гор Цилиан были проведены полевые исследования, в ходе которых выполнены измерения террас реки Байян в западной части гор Цилиан.
- <u>5.2. Геоморфологические особенности западных гор Цилиан.</u> Чтобы охарактеризовать геоморфологические особенности западных гор Цилиан построены карта склонов и два топографических профиля по данным цифровой модели рельефа с точностью до 30 м. Эти данные показывают, что рельеф местности в северных горах Цилиан более холмистый по сравнению с рельефом в центральных и южных горах.
- <u>5.3. Характеристики долины реки Байян в западных горах Цилиан.</u> Река Байян, прорезающая северный край гор Цилиан одна из крупнейших рек в этом районе. Анализируя отдельные участки долины реки Байян, обнаружено, что ее строение в среднем течении, очевидно, отличается от верхнего и нижнего. Основные проявления: сужение долин и русел рек, преобладание донной эрозии, увеличение количества террас, широкое развитие высоких (древних) террас, также изменение их типов, в основном это эрозионные и цокольные террасы (рис. 7). Эти явления показывают, что в среднем течении реки Байян преобладает более интенсивная донная эрозия.



- **Рис. 7.** Террасы реки Байян. (а) Изображение реки Байян, положение изображения показано на (рис. 2); (б, в, г) фото террас нижнего, среднего и верхнего течения; (д, е, ж) поперечные профили нижнего, среднего и верхнего течения.
- <u>5.4. Кинематика активных разломов в бассейне реки Байян.</u> Реку Байян пересекают четыре активных разлома (с юга на север): Чанма, Ханьща, Юмен и Байнан (рис. 7а). Тектонические движения по активным разломам вызывают разрушение и деформацию речных террас. По измерению деформации речных террас и определению их возраста можно количественно оценить скорость смещения по активным разломам.
- 5.4.1.~ Разлом Чанма. Разлом Чанма длиной около 120 км представляет собой один из главных разломов внутри гор Цилиан. Направление простирания разлома Чанма северо-северо-западное, наклон сместителя на юго-запад составляет  $50^{\circ}$ – $70^{\circ}$ . Согласно профилям разлома и деформации речных террас установлено, что разлом Чанма обладает взбросовой кинематикой с левосдвиговой компонентой. По измерению высоты террас установлено, что на террасе Т3 произошло вертикальное смещение на  $18 \pm 2$  м (табл. 1). Согласно датированию методом фотолюминесценции возраст террасы Т3 составляет  $58,72 \pm 9,47$  тыс. лет. Исходя из этого средняя вертикальная скорость смещения по разлому Чанма с  $58,72 \pm 9,47$  тыс. лет оценивается в  $0,31 \pm 0,06$  мм/год. (табл. 1) (рис. 8).
- <u>5.4.2. Северный Цилианский разлом.</u> Северный Цилианский разлом крупная система взбросов, которая разделяется на два разлома в районе реки Байян Ханьща и Юмен. В зоне разлома Ханьща не наблюдается очевидных смещений террас. Это доказывает, что с позднего неоплейстоцена разлом Ханьща был относительно спокойным.

В зоне наиболее молодого северного разлома Юмен, который подрезает антиклиналь Лаоцзюньмао, хорошо выражены деформации молодых террас в долинах реки Байян. По измерению высоты террас установлено, что вертикальное смещение террасы Т3 составляет 21,4  $\pm$  1,2 м и Т5 — 21,4  $\pm$  1,2 м. Возраст террас изменяется от 13,0  $\pm$  4,5 до 64,4  $\pm$  9,0 тыс. лет от низких к высоким. За 13,0  $\pm$  4,5 тыс. лет скорость вертикального смещения по разлому Юмен составила 0,68  $\pm$  0,09 мм/год. Скорость вертикального смещения по разлому Юмен с 64,4  $\pm$  9,0 тыс. лет назад составила 0,33  $\pm$  0,02 мм/год (табл. 1) (рис. 8).

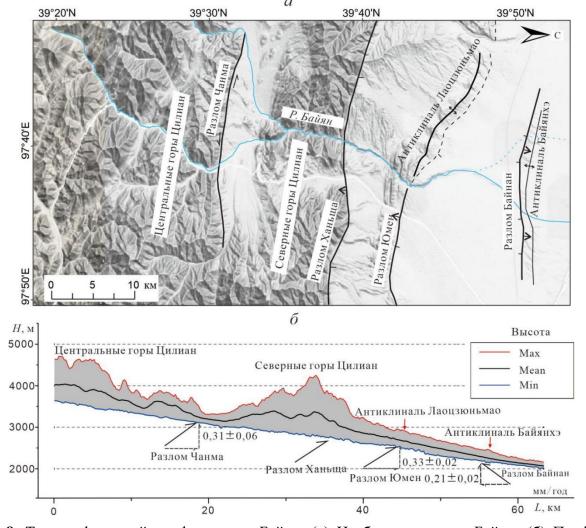
- <u>5.4.3. Разлом Байнан.</u> Разлом Байнан протяженностью около 20 км простирается в западно-северо-западном направлении, наклонен к северу с углом падения около 30°. На южном крыле разлома Байянхэ обнажается пять поверхностей террас. Максимальная высота самой древней поверхности T5 составляет 36 м; на поверхности T4 23,5 м; на поверхности T3 14,5 м; на поверхности T2 10,5 м; на поверхности T1 5,0 м (табл. 1). Используя величины высот и возраст террас удалось установить скорости вертикального смещения по разлому: для поверхности T5 они составляют  $0.21 \pm 0.02$  мм/год; для поверхности T4  $0.28 \pm 0.03$  мм/год; для поверхности T3  $0.20 \pm 0.02$  мм/год; для поверхности T2  $0.27 \pm 0.04$  мм/год (табл. 1) (рис. 8).
- <u>5.5. Характеристики неотектонической деформации западных гор Цилиан.</u> Активные разломы в западных горах Цилиан в кинематическом отношении являются взбросами. Карта уклонов, профили рельефа и геоморфологические особенности террас реки Байян показывают, что поднятие земной коры в северных горах Цилиан происходит быстрее, чем в центральных и

южных горах. По данным вертикального смещения террас и их возрастных датировок скорость вертикального смещения по этим взбросам с позднего неоплейстоцена изменялась в пределах 0,3–0,7 мм/год.

<u>5.6. Выводы.</u> Вертикальные смещения по разломам в бассейне реки Байян указывают на то, что активные разломы в западных горах Цилиан характеризуются взбросами. По данным вертикального смещения террас и их возрастных датировок скорости вертикальных смещений по этим взбросам с позднего неоплейстоцена колеблются в пределах 0,3–0,7 мм/год.

Таблица 1. Смещение, возраст и скорость активных разломов в бассейне Байянхэ

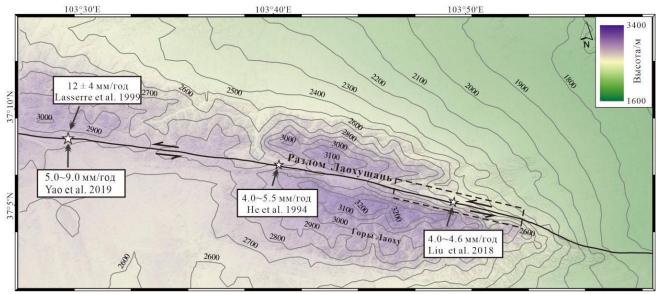
Разломы	Террасы	Перемещения террасы (м)	Возраст (тыс. лет)	Вертикальная скорость (мм/год)
Чанма	Т3	18 ± 2	$58,72 \pm 9,47$	$0.31 \pm 0.06$
Юмен	Т3	$8,8 \pm 1,2$	$13,0 \pm 4,5$	$0,68 \pm 0,09$
	T5	$21,4 \pm 1,2$	$64,4 \pm 9,0$	$0,33 \pm 0,02$
Байнан	T2	10,5	$39,9 \pm 5,8$	$0,\!27 \pm 0,\!04$
	Т3	14,5	$73,4 \pm 8,8$	$0,\!20 \pm 0,\!02$
	T4	23,5	$85,0 \pm 9,8$	$0,\!28 \pm 0,\!03$
	T5	36	$174,6 \pm 18,2$	$0,21 \pm 0,02$



**Рис. 8.** Топографический профиль реки Байян. (а) Изображение реки Байян; (б) Профиль рельефа в районе реки Байян, на котором показана скорость смещения по активным разломам.

## Глава 6. Позднечетвертичная тектоническая деформация в средней части разлома Хайянь в восточных горах Цилиан

- 6.1. Тектоническая обстановка восточных гор Цилиан. Восточные горы Цилиан расположены к западу от разлома Люпанышань и к востоку от разлома Элашань (рис. 2). В восточных горах Цилиан в отличие от западных гор развиты крупные сдвиги, которые являются активными границами различных блоков. Тектоническая деформация и сейсмическая активность на востоке гор Цилиан в основном сосредоточены в этих сдвиговых разломах, а внутри гор они незначительны (рис. 2). Разлом Хайянь представляет собой крупный левый сдвиг и является северной границей восточных гор Цилиан, который играет важную роль в компенсации относительного смещения между блоками. В этой главе с помощью структурногеоморфологического метода определяется характер деформаций и скорость смещения по разлому Хайянь.
- <u>6.2. Разлом Хайянь.</u> Разлом Хайянь ориентирован на запад-северо-запад и пересекается с рядом взбросовых разломов в западной части гор Цилиан под острым углом (рис. 2). Разлом Хайянь имеет левосдвиговое смещение с юго-западным падением поверхности сместителя под углом 70°–80°. С запада на восток его можно разделить на разломы Ленглунлин, Цзиньцянхэ, Маомаошань, Лаохушань, узкий разлом Хайянь и разлом Люпаньшань.
- 6.3. Кинематика разлома Лаохушань. Разлом Лаохушань расположен в середине разлома Хайянь и характеризуется левосдвиговым смещением (рис. 9). Однако, скорость смещения по разлому, измеренная предшественниками, разная. В этом работе были проведены детальные полевые исследования и высокоточные топографические измерения в районе 10 км в восточной части разлома Лаохушань. Для определения активности и скорости смещения по разлому Лаохушань с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) получена высокоточная цифровая модель рельефа (DEM) разлома Лаохушань с точностью до сантиметра,

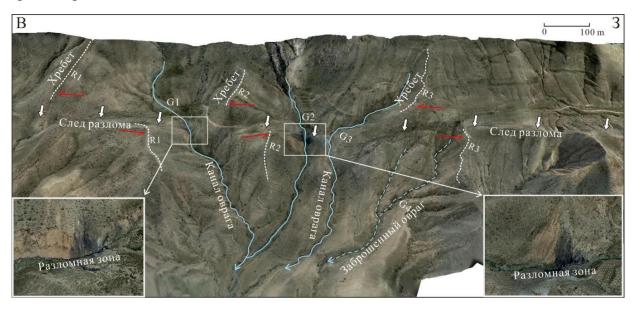


**Рис. 9.** Топографическая карта разлома Лаохушань и его скорость смещения. Положение карты показано на (рис. 2).

<u>6.3.1. Геометрия разлома Лаохушань.</u> В результате полевых геологических исследований и геоморфологических измерений выявлено общее простирание разлома

Лаохушань в запад-северо-западном направлении в пределах от  $105^{\circ}$  до  $120^{\circ}$ . Восточная часть разлома Лаохушань отклоняется на юго-восток под углом  $10^{\circ}-15^{\circ}$ . Разлом падает на юго-запад под углом  $70^{\circ}-80^{\circ}$ .

6.3.2. Характеристики деформаций по разлому Лаохушань. У северного подножия гор Лаохушань развиты такие геоморфологических формы, как горные хребты, каналы, террасы с веерными потоками (рис. 10), которые испытывают левосдвиговое смещение по разлому Лаохушань. Кроме того, в некоторых участках наблюдалось небольшое вертикальное смещение, что указывает на небольшое сбросовое смещение по разлому Лаохушань. Различные тектонические признаки говорят о том, что разлом Лаохушань, начиная с позднего неоплейстоцена, характеризуется левосдвиговым смещением с небольшой сбросовой компонентой.



**Рис. 10.** Трехмерная геоморфологическая аэрофотосъёмка восточной части разлома Лаохушань, полученная с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

	,	' ' ' I	1 ''	1	5
Террасы	Возраст	Смещение (м)		Скорость смещения (мм/год)	
	террас	Горизонтальное	Вертикальное	Скорость по	Вертикальная
	(тыс. лет)			левому сдвигу	скорость
T1		13 ± 2			
T2	$5,0 \pm 0,3$	22 ± 4		$4,4 \pm 0,8$	
Т3	$12,8 \pm 0,7$	52 ± 5	5 ± 1	$4,1 \pm 0,4$	$0,4 \pm 0,08$
T4	$28,2 \pm 1,7$	95 ± 8	12 ± 1	$3,4 \pm 0,3$	$0,4 \pm 0,03$
T5		$185 \pm 25$			

Таблица 2. Смещение, возраст и скорость движения по разлому Лаохушань

6.4. Характеристики неотектонических деформаций восточных гор Цилиан. Различные тектонические признаки показывают, что средняя часть разлома Хайянь характеризуется левосдвиговым смещением с небольшой сбросовой компонентой. Скорость горизонтального левосдвигового смещения по разлому Хайянь с позднего неоплейстоцена составляет  $4\pm0.6$  мм/год, скорость вертикального смещения —  $0.4\pm0.08$  мм/год. Большинство результатов исследований показывают, что с позднего неоплейстоцена скорость смещения по средней части разлома Хайянь составляет 4-7 мм/год [Liu et al., 2022] и согласуется со современной скоростью (5-7 мм/год) по данным GPS. Таким образом, разлом Хайянь считается важным пограничным разломом в восточной части гор Цилиан, компенсирующим относительное смещение между восточными горами Цилиан и северным блоком Алашань.

<u>6.5. Выводы.</u> На основании горизонтального и вертикального смещений речных террас установлены левосдвиговые смещения со сбросовой компонентой для средней части разлома Хайянь на востоке гор Цилиан. По перемещению и возрастным датировкам террас скорость горизонтального смещения по разлому Хайянь с позднего неоплейстоцена составляет ~4 мм/год и вертикального смещения — ~0,4 мм/год.

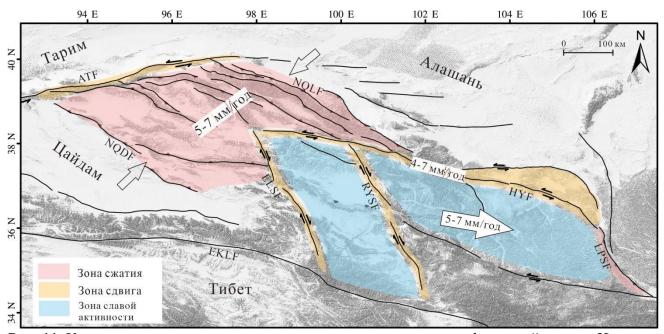
#### Глава 7. Обсуждение

7.1. Неотектоническая деформация гор Цилиан. Горы Цилиан поглотили сокращение земной коры Тибетского нагорья в северо-восточном направлении. В горах Цилиан наблюдается два типа тектонических движений земной коры: деформация сжатия в северо-северо-восточном направлении в западных горах Цилиан и движение земной коры на восток в широтном направлении в восточных горах Цилиан. В западных горах Цилиан скорость сокращение земной коры составляет 5–7 мм/год (рис. 11), что реализуется в образовании взбросов и складок. Причем количество сокращения земной коры, поглощённой северными горами Цилиан, было значительно больше, чем в центральных и южных горах Цилиан.

В восточных горах Цилиан скорость сокращения земной коры составляет 2–3 мм/год, что очевидно меньше, чем в западных горах Цилиан. В то же время, в восточных горах Цилиан скорость движения земной коры на восток составляет 5–7 мм/год, что согласуется со скоростью левосдвигового смещения по разлому Хайянь (4–7 мм/год) (рис. 11). Разлом Хайянь считается важным пограничным разломом, компенсирующим движение земной коры

восточных гор Цилиан на восток. Восточные горы Цилиан выявлены сдвиговой деформацией вдоль пограничных разломов.

Деформация сжатия в северо-восточном направлении на западе гор Цилиан и сдвиговая деформация на востоке гор Цилиан подтверждаются геоморфологическими, сейсмическими и GPS данными. По сравнению и анализу результатов установлено, что западные горы Цилиан соответствуют "модели утолщения земной коры", а восточные горы Цилиан — "модели экструзии земной коры". Скорости левосдвигового смещения по разлому Хайянь, измеренные на основе перемещений речных террас, согласуются с данными о современных тектонических движениях, полученных с помощью GPS, что свидетельствует об их унаследованности.

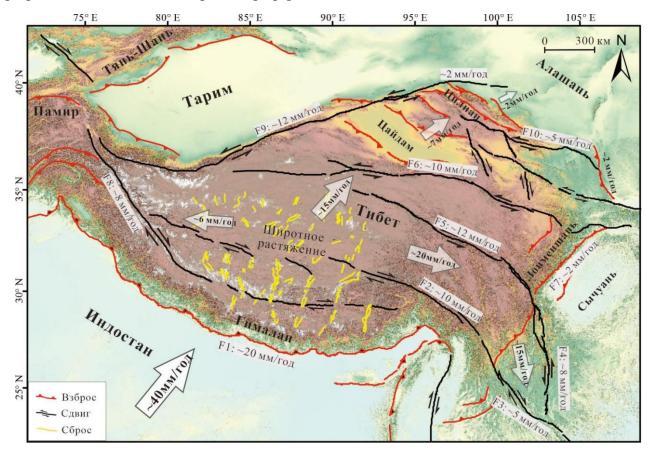


**Рис. 11.** Карта пространственного распределения тектонических деформаций в горах Цилиан. Активные разломы: ATF — Алтынтаг; ELSF — Елашань; HYF — Хайянь; LPSF — Люпаньшань; NQDF — северный Цилианский; NQLF — северный Цайдамский; RYSF — Риюешань; SLNSF — Шуленаньшань.

7.2. Взаимосвязь между неотектонической деформацией гор Цилиан и геодинамикой Тибетского нагорья. Взаимосвязь между ними в основном отражается в двух аспектах. Вопервых, способы неотектонической деформации аналогичны характеристикам всего Тибетского нагорья. Существуют два способа поглощения земной коры: деформация сжатия земной коры в северо-восточном направлении и удлинение земной коры в широтном направлении, что наблюдаются не только в горах Цилиан, но и в других частях Тибетского нагорья. В дополнении к горам Цилиан, другой областью с деформацией сжатия является Гималайский ороген, расположенный южнее Тибетского нагорья (рис. 12). Удлинение земной коры в широтном направлении существует и в центральной части Тибета (рис. 12).

Во-вторых, поднятие и неотектоническая деформация гор Цилиан тесно связаны с расширением Тибетского нагорья на север в среднем-позднем миоцене. В дополнении к горам Цилиан, в течение этого периода серия тектонических событий произошла вокруг Тибетского нагорья. Горы Алтынтанг на севере Тибета начали подниматься в период с 19 до 13 млн. лет назад [Chen et al., 2001; Zheng et al., 2003], горы Люпаньшань на северо-востоке нагорья — около 8 млн. лет назад [Zheng et al., 2006; Zhang et al., 2006], горы Лунмэньшань,

расположенные на востоке Тибета, испытали быстрое поднятие 11–5 млн. лет назад [Clark et al., 2005; Chen et al., 2006]. Центральная часть Тибетского нагорья начала двигаться на восток в широтном направлении в позднем миоцене [Sanchez et al., 2013; Zhang et al., 2007]. Эти события показывают, что Тибетское нагорье расширилось к периферии в миоцене и поднятие гор Цилиан в среднем-позднем миоцене (14–8 млн. лет назад) является отражением процесса разрастания Тибетского нагорья к периферии.



**Рис. 12.** Схема тектонической деформации Тибетского нагорья [Zhang et al., 2004 с дополнениями]. Активные разломы: F1 — Гималайский разлом; F2 — разлом Цзяли; F3 — разлом Хунхэ; F4 — разлом Сяоцзян; F5 — разлом Сяньшуйхэ; F6 — разлом Куньлунь; F7 — разлом Лунменшань; F8 — разлом Каракорум; F9 — разлом Алтынтаг; F10 — разлом Хайянь.

#### Заключение

Столкновение Индостана с Евразией привело к поднятию и тектонической деформации гор Цилиан, расположенных на северо-востоке Тибетского нагорья. 15%—20% сокращения земной коры Тибетского нагорья поглощается в области гор Цилиан, но сам способ сокращения земной коры остается неясным. На основании изучения осадочных разрезов в кайнозойских бассейнах определено, что горы Цилиан начали подниматься среднем и позднем миоцене (14—8 млн. лет). В работе для выявления неотектонической деформации гор Цилиан были изучены и проанализированы данные сейсмических материалов и геодезических съемок, собраны материалы по активным разломам, проведены корреляции и измерения высотного положения уровней речных террас. Западные горы Цилиан характеризуются деформацией сжатия земной коры в северо-восточном направлении, а восточные горы Цилиан — сдвиговой деформацией вдоль пограничных разломов. Вертикальные смещения по разломам в бассейне реки Байян указывают на то, что активные разломы в западных горах Цилиан проявляются в

виде взбросов. По данным вертикального смещения террас и их возрастных датировок скорости вертикальных смещений по этим взбросам, начиная с позднего неоплейстоцена, колеблются в пределах 0,3–0,7 мм/год. Разлом Хайянь в восточных горах Цилиан считается важным пограничным разломом, компенсирующим движение земной коры восточных гор Цилиан на восток. На основании горизонтального и вертикального смещений речных террас установлены левосдвиговые смещения со сбросовой компонентой для средней части разлома Хайянь на востоке гор Цилиан. По перемещению и возрастным датировкам террас скорость горизонтального смещения по разлому Хайянь с позднего неоплейстоцена составляет ~4 мм/год и вертикального смещения — ~0,4 мм/год. Скорости неотектонических деформаций гор Цилиан согласуются с данными о современных тектонических движениях, полученных с помощью GPS, что свидетельствует об их унаследованности. Полученные результаты работы указывают на то, что образование западных гор Цилиан согласуется с моделью утолщения земной коры, а восточных гор Цилиан — с моделью экструзии земной коры.

### III. СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованных в журналах WoS, Scopus, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.1 - Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика

- 1) *Chen Zhidan*, *Xu Wenbin*, *Liu Rui*, *Li An*, *Koronovsky N. V*. Tectonic Deformation of the Western Qilian Shan in Response to the North–South Crustal Shortening and Sinistral Strike-Slip of the Altyn Tagh Fault Inferred From Geomorphologic Data // Frontiers in Earth Science. 2022. 10:808935. Scopus (1,09 п.л., личный вклад автора 70%, SJR 1,027)
- 2) **Чэнь Чжидань**, Н. В. Короновский. Активные современные разломы западного сегмента гор Цилиан (северный Тибет) // Вестник Московского университета., Серия 4: Геология. 2020. №. 2. С. 9–17. RSCI (0,52 п.л., личный вклад автора 80%, ИФ РИНЦ 0,575)
- 3) Liu Rui, Li An, Zhang Shimin, Guo Changhui, Chen Zhidan. A NW-striking dextral strike-slip fault at the eastern end of the Altyn Tagh fault and its tectonic implications for northernward growth of the Tibetan Plateau // Journal of Asian Earth Sciences. 2020. Vol. 188. P. 1–15. Scopus (0,86 п.л., личный вклад автора 30%, SJR 1,123)
- 4) Yang Haibo, Li An, Cunningham Dickson, Yang Xiaoping, Zhan Yan, Chen Zhidan, Hu Zongkai, Zuo Yuqi, Sun Xiangyu, Tang Ruoni. An evolving lithospheric-scale wrench fault system along the eastern end of the Altyn Tagh Fault: Kinematics and Quaternary Activity of the Heishan fault system, western China // Tectonics. 2023. Vol. 42. №. 3. 2023TC007764. Scopus (1,61 п.л., личный вклад автора 20%, SJR 1,962)
- 5) Liu Rui, Li An, Zhang Shimin, Chen Zhidan, Guo Changhui. The late quaternary tectonic deformation revealed by the terraces on the Baiyang River in the northern Qilian Mountains // Dizhen Dizhi. 2017. Vol. 39. №. 6. Р. 1237–1255 (in Chinese with English abstract). Scopus (1,09 п.л., личный вклад автора 30%, SJR 0,381)

#### Тезисы конференции и иные публикации

- 6) *Chen Zhidan*. The seismogenic characteristics of the 2022 Mw6.7 Menyuan earthquake and its implications for tectonic deformation in the northeastern margin of the Tibetan Plateau // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2022», Москва. 2022. С. 24. (личный вклад автора 100%)
- 7) **Чэнь Чжидань**. Поднятие и характеристики тектонических деформаций гор Цилиан (северо-восточная окраина Тибета) // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021», Москва. 2021. С. 21. (личный вклад автора 100%)
- 8) **Чэнь Чжидань**. Исследование активности земной коры с помощью речных геоморфологических методов в западном сегменте гор Цилиан (на северо-восточном краю Тибета) // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2019», Москва. 2019. С. 22. (личный вклад автора 100%)
- 9) Li An, Liu Rui, Chen Zhidan, Zhang Shimin. Folds and faults characteristics in the western end of Hexi Corridor and its significance to the extension model of the northern margin of the Tibet Plateau

// GSA Annual Meeting in Indianapolis, Indiana, USA. 2018. №. 173. Р. 10. (личный вклад автора — 30%)

10) *Chen Zhidan*, *Liu Rui*, *Zhang Shimin*, *Li An*, *Koronovskii N. V*. The research of crustal activity in the western segment of the northern margin of the Qilian Mountains based on river geomorphology // South China Journal of Seismology. 2020. Vol. 40. №. 1. P. 1–10 (in Chinese with English abstract). (0,58 п.л., личный вклад автора — 30%)