

НОВЕЙШАЯ ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КАВКАЗА: СОВРЕМЕННЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ И МЕХАНИЗМ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

© 2024 г. В. Н. Татаринов^{1,2, *}, В. И. Кафтан¹, А. И. Маневич^{1,3}, Б. А. Дзедобоев^{1,4},
Б. В. Дзеранов^{1,4}, А. М. Авдоница¹, И. В. Лосев^{1,3}, А. А. Королькова¹

¹Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

³Горный институт НИТУ «МИСИС», г. Москва, Россия

⁴Геофизический институт ВНИИ РАН, г. Владикавказ, Россия

*E-mail: v.tatarinov@gcras.ru

Поступила в редакцию 14.02.2024 г.

После доработки 18.03.2024 г.

Принята к публикации 22.03.2024 г.

Общепризнано, что формирование складчато-надвиговых тектонических структур подвижных поясов континентов связано с раздавливанием и сужением земной коры в результате коллизии литосферных плит. Деформирование литосферы Кавказа в новейшее время, в целом, согласуется с этими представлениями. Однако ее блоковая дифференциация вносит своеобразие в направленность современных вертикальных и горизонтальных движений. В статье приводятся результаты анализа вертикальных движений Кавказа, полученных средствами высокоточного нивелирования за более чем столетний период, и их пространственной увязки с тектоникой, сейсмичностью, напряженно-деформированным состоянием и геофизическими полями. Обнаружена четкая взаимосвязь, свидетельствующая о глубинной тектонической природе длительных подъемов земной коры Кавказа.

Дифференциация движения Аравийской плиты порождает разделение территории Кавказа на провинции, отличающиеся между собой по характеру современных движений, ориентировке разрывных структур и напряженно-деформированному состоянию. Их сейсмический режим также имеет отличия в количестве сейсмических явлений и фокальных механизмов землетрясений. Предложена модель механизма деформирования Большого Кавказа, учитывающая тенденцию его многолетнего подъема в условиях общего укорочения земной коры. Результаты анализа положены в основу обсуждения возможного механизма тектонической эволюции Большого Кавказа в новейшее время, которое может быть использовано при оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе.

Ключевые слова: Кавказ, вертикальные движения, земная кора, тектоническая эволюция, геометрическое нивелирование, подъем, деформации, сейсмическая опасность.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724040068>, **EDN:** FWTYBY

ВВЕДЕНИЕ

Большой Кавказ образовался в результате столкновения Аравийской и Евразийской литосферных плит приблизительно 23–28 млн лет назад. В силу своей молодости эта горная система отличается от древних складчатых областей континентов контрастной согласованностью форм рельефа и тектонических структур. Анализ особенностей этого горного сооружения, связанных с новейшей тектонической эволюцией, позволяет лучше понять механизм

деформирования земной коры в зонах столкновения континентальных плит. На неотектоническом этапе развития Большой Кавказ служит геодинамическим аналогом Южного Тянь-Шаня [Большой..., 2007]. Коллизия Индостанской и Евразийской плит примерно 40–50 млн лет назад привела к образованию Гималаев, которые и сейчас продолжают подниматься со скоростью около 7 мм/год. Из геологических разрезов Большого Кавказа и Гималаев видно, что у них очень много общего. Но в последнее время

появляются публикации, ставящие под сомнение устоявшуюся гипотезу происхождения Гималаев. Например, в работе [Ibarga et al., 2023] представлены убедительные доказательства, что высота Гималаев превосходила 3.5 км еще до начала столкновения Индостана и Евразии.

Несмотря на хорошую изученность, геотектонические концепции образования Большого Кавказа разбросаны в весьма широком диапазоне — от геосинклинальной [Шолпо, 1978] до субдукционной [Хаин, Ломизе, 2010; и др.]. Абсолютное большинство авторов [Трифонов, 2017; Хаин, Ломизе, 2010; Расцветаев, 2002; и др.] считают, что формирование покровно-складчато-надвиговой структуры Кавказа связано с сужением литосферы в результате сближения литосферных плит. В то же время, результаты ГНСС-измерений на территории Большого Кавказа [Лукк, Шевченко, 2019; Гурбанов и др., 2023] не согласуются с этими представлениями, поскольку согласно им, земная поверхность в данном районе не сужается, а расширяется. Для объяснения этого явления геологами выдвигаются достаточно “экзотические” гипотезы (в то же время имеющие сильные аргументы). Например, наличие в глубине выпирающего тела (диапира), плюма, уменьшения плотности верхнего слоя и др. Так как при общей тенденции к сужению глубинной части литосферы Кавказа, чисто с геометрических позиций, сферическая верхняя часть земной коры может расширяться при подъеме. В любом случае разрешить это противоречие может помочь сравнительный анализ вертикальных и горизонтальных движений и тектонических особенностей региона.

Один из постулатов геодинамики заключается в пространственной взаимосвязи скоростей современных движений с морфоструктурной дифференциацией земной коры на всех иерархических уровнях. Пространственный анализ вариативности движений, привязанный к основным геологическим, геоморфологическим и сейсмологическими особенностям, позволяет смоделировать механизм новейшего тектонического развития как для Большого Кавказа, так и для всей Альпийско-Гималайской складчатой области. Академик Ю.Г. Леонов подчеркивал, что “предлагать полностью сформированную модель тектоники Большого Кавказа сейчас преждевременно” [Большой..., 2007]. Тем не менее, системное обобщение геоданных позволяет построить геодинамические модели, которые будут полезны для оценки сейсмической опасности на Кавказе. По утверждению Л.А. Сим “неотектоника является тем

связующим звеном между тектоникой древних комплексов и современной геодинамикой, которая позволяет не только решать проблемы современной сути явлений, но и перейти к прогнозу реализации этих явлений во времени” [Сим, Гордеев, 2022].

Оценка сейсмической опасности невозможна без модели, построенной на физических представлениях об очагах землетрясений как завершения процесса деформирования и разрушения земной коры, при поступлении энергии извне. В основу закладываются представления о поле напряжений, кинематике, структуре нарушений, свойствах среды и др. [Физические..., 1980]. Параметром, поддающимся прямому измерению и раскрывающим причины генерации сейсмических событий, является *скорость деформирования земной коры*, которая связана со способностью среды накапливать или диссипировать механическую энергию [Гзовский, 1975; Кочарян, 2010].

Имеющиеся данные о горизонтальных современных движениях земной коры (СДЗК), полученные с использованием средств ГНСС [McClusky et al., 2000; Reilinger et al., 2006; Шевченко и др., 2016; Милуков и др., 2017; Гурбанов и др., 2023], указывают на то, что Главный хребет и Северный склон Большого Кавказа преимущественно смещаются в сторону оси антиклинория, а северная часть прогиба Южного склона — на север. Также имеются уникальные данные по нескольким эпохам наблюдений за вертикальными движениями земной коры, полученные методом высокоточного нивелирования, охватывающие столетний период [Kaftan, 1996; Лилиенберг и др., 1997; Карта..., 1971; 1973; 1986].

Цель настоящей работы заключается в сопоставлении этих результатов с тектоникой, сейсмичностью, напряженно-деформированным состоянием и геофизическими полями для идентификации механизма тектонических движений и построения геодинамической модели, учитывающей архитектуру тектонических структур первого и второго порядка. В качестве исходного материала использованы оцифрованные результаты геодезических наблюдений за вертикальными СДЗК за 100-летний период, результаты обобщения ГНСС-наблюдений за 30 лет, пространственные особенности неотектонических структур, сейсмологические и геоморфологические результаты исследований различных авторов.

АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО НОВЕЙШЕЙ И СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКЕ КAVKAZA

Новейшая тектоника

Кавказ — зона молодой альпийской складчатости, часть Альпийско-Гималайского горного пояса. Значительный вклад в изучение его неотектоники внесли выдающиеся геологи: В.Е. Хаин, Е.Е. Милановский, А.В. Николаев, В.Н. Шолпо, А.А. Никонов, В.Г. Трифонов, Ю.Г. Леонов, Л.М. Расцветаев, В.И. Шевченко, М.Л. Копп, Е.А. Рогожин и др. Его главными структурными элементами являются горные сооружения Большого и Малого Кавказа, разделяемые бассейнами рек Куры и Риони (рис. 1а) [Philip, Gvishiani et al., 1989; Большой..., 2007; Трифонов, 2017]. С юга к региону примыкает Восточно-Анатолийское плато как переходная зона от Аравийской тектонической плиты к мегантиклинориям Малого и Большого Кавказа. Вершины Большого Кавказского хребта достигают высот до 5.6 км. Малый Кавказ выражен в среднем горными сооружениями высотой порядка 3 км. Межгорные впадины в северо-западной и юго-восточной частях региона образуют связь осадочных бассейнов Черного и Каспийского морей [Общая, 1977].

Большой Кавказский хребет согласуется с Главным Кавказским разломом, который является поддвигом Закавказского массива под Большой Кавказ под углом 60–75°. По сути, это шов между Евразийской плитой и консолидированной корой. Основные структурные субширотные нарушения Большого Кавказа в своем большинстве представлены надвигами (рис. 1б). Тектонические разломы Малого Кавказа имеют преимущественно сдвиговый механизм со взбросовой компонентой. Армянское нагорье, двигаясь на север под давлением Аравийской плиты (рис. 2), передает усилия, которые проявляются левосторонними и правосторонними смещениями по разломам, секущим центральную часть Большого Кавказа (рис. 1а), соответственно, на западе и на востоке [Милановский, Хаин, 1968].

Большой Кавказ состоит из приподнятого и интенсивно раздробленного тектоническими швами северо-восточной ориентировки Западного Кавказа и менее приподнятого, но более монолитного, осложненного лишь отдельными зонами поперечных разрывов Восточного Кавказа. Их граница проходит по Казбек-Цхинвальскому глубинному шву, выраженному в рельефе ступенью с признаками левосдвиговых смещений

(рис. 1а) [Милановский, Хаин, 1968; Хаин, Ломизе, 2010; Трифонов, 2017]. Горная система в поздний альпийский период формировалась в условиях поперечного сжатия и компенсационного удлинения как по вертикали, так и вдоль орогена [Копп, 2007].

Достаточно полно обобщение исследований по новейшей тектонике изложено в работе [Лукина, 1983], где подчеркивается, что на Кавказе новейшие движения выражаются:

- в геометрии молодых разломов и выходах пород разного возраста на дневную поверхность;
- в ориентировке хребтов, долин, береговой линии, особенностей гипсометрии;
- в форме изолиний мощностей земной коры, кристаллического фундамента, геофизических полей, глубины границы Мохо.

Важнейшая особенность заключается в том, что субмеридиональная Казбек-Севанская флексура в центральной части Большого Кавказа делит его на западную и восточную половины (см. работу [Лукина, 1983]). При этом субмеридиональные сдвиги, прерывающие системы субширотных надвигов, имеют более молодой возраст. Помимо неодинакового гипсометрического положения палеозойского фундамента эти две части различаются и по характеру нарушения поперечными дислокациями северо-восточного простираения (западная половина Кавказа нарушена сильнее, чем восточная [Лукина, 1983]) и, как будет показано ниже, по интенсивности сейсмических проявлений.

Кинематика блоковых структур

При анализе полей движений и деформаций необходимо рассматривать иерархию, качественно характеризующую по совокупности признаков их однородность [Трифонов и др., 2002]. Различают два иерархических типа полей: “иерархия масштабов” и “иерархия уровней” (см. работу [Мячкин и др., 1982]). Иерархия масштабов — локальные поля, возникающие в окрестностях неоднородностей различного размера. Иерархия уровней — совокупность одновременно существующих и “вложенных” одно в другое полей различного размера. Кинематика региона определяется следующими уровнями: *в первом*, глобальном, вектор движений напрямую связан с силовым давлением Аравийской плиты; *второй*, региональный уровень, обусловлен силовым взаимодействием разномасштабных блоков, создающих сложные структуры тектонических движений [Осокина, 1987], которые изменяют направления векторов

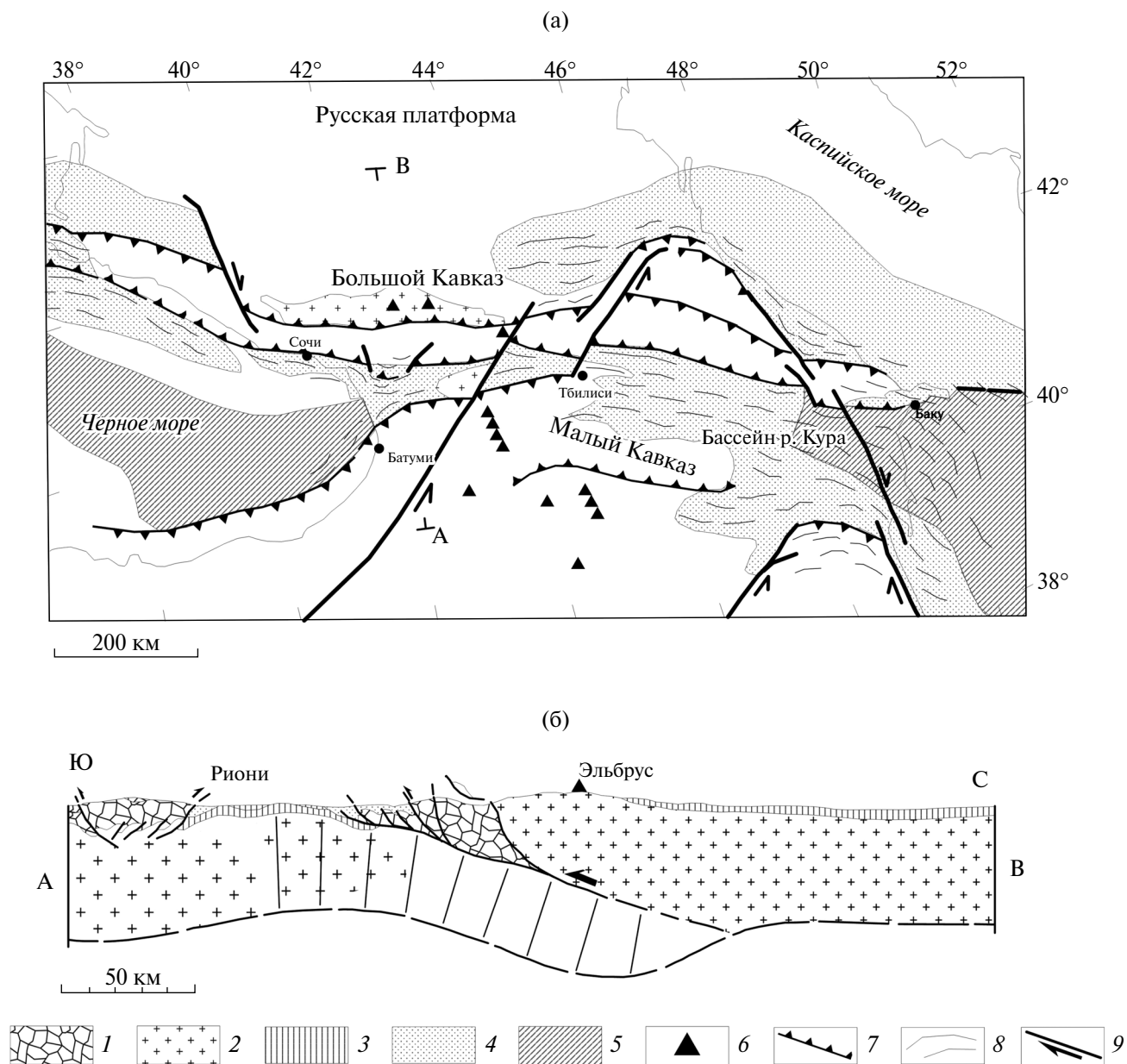


Рис. 1. Упрощенная структурная схема Кавказа (а) и разрез по линии А–В (б) с учетом работы [Philip, Gvishiani et al., 1989]: 1 – осадочные породы; 2 – континентальная кора; 3 – кора краевого бассейна; 4 – молодые осадочные бассейны; 5 – океаническая кора; 6 – вулканы; 7 – крупные надвиги; 8 – складки; 9 – крупные сдвиги.

глобальных движений. За счет интерференции от различных силовых источников направления движений блоков могут меняться, вплоть до противоположных.

На рис. 2 приведена наиболее известная модель [Reilinger et al., 2006] направлений СДЗК региона. Видно, что Аравийская плита движется строго на север со скоростью приблизительно 15 мм/год. В районе Анатолийской плиты северный выступ Аравийской плиты “упирается” в жесткий литосферный блок и направление движения раздваивается: на запад и северо-восток с азимутами

~275° и ~30° и скоростями 21 мм/год и 13 мм/год соответственно. В работе [McClusky et al., 2000] авторами высказано предположение, что обусловлено это тем, что глубинная прочная часть литосферы под Черным морем перераспределяет давление Аравийской плиты – резко на запад по сдвигу Северо-Анатолийского разлома и на северо-восток – в сторону Закавказья. В любом случае, какими бы причинами (анализ которых не входит в задачи настоящей работы) это не объяснялось, изменение направления движений доказывалось результатами ГНСС-наблюдений.

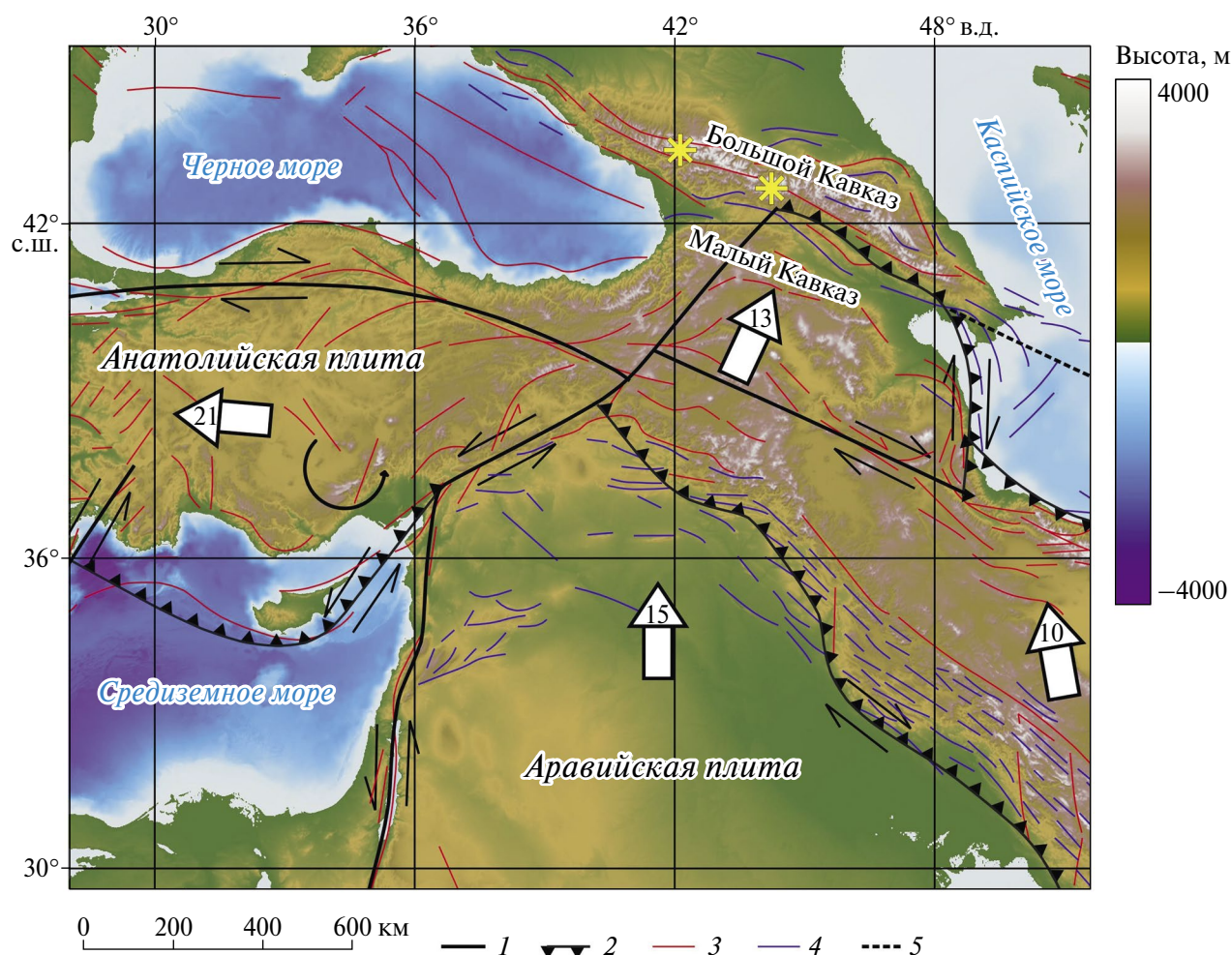


Рис. 2. Зона столкновения Аравийской и Евразийской плит по работе [Reilinger et al., 2006]: 1 – крупные тектонические сдвиги; 2 – границы зон сжатия (надвиги); 3 – разрывы; 4 – складки; 5 – предполагаемые разломы. Белые стрелки и цифры – направления и скорости движения плит (мм/год) относительно Евразии; желтые звезды – вулканы Эльбрус и Казбек.

В статье [Лукк, Шевченко, 2019] обсуждается унаследованность современных движений. Авторы констатируют, что “выявляется тесная пространственная, кинематическая и, по-видимому, генетическая связь между процессом формирования альпийской складчато-надвиговой тектонической структуры Большого Кавказа и современными смещениями элементов земной коры региона, выявляемыми по смещениям пунктов и станций GPS-измерений”. Таким образом, современные движения – это продолжение процесса эволюции земной коры мезозойско-кайнозойского периода, частным случаем которых является формирование закономерно ориентированных систем разрывов (рис. 3).

В работе [Шевченко и др., 2016] утверждается, что на современном этапе тектонического развития происходит увеличение ширины

прогиба Южного склона Большого Кавказа. В качестве причины этого авторы выдвигают гипотезу, что это связано с процессами объемного расширения и увеличения площади слоистых горных пород в результате привноса в них минерального материала восходящими потоками глубинных флюидов. Тезис об объемном расширении самой верхней части коры убедителен, так как при выпирании происходит снятие бокового давления и относительно менее плотные осадочные породы разуплотняются (“растекаются”). Площадь земной поверхности при этом увеличивается.

Разрывные нарушения

Тектонические деформации парагенетически связаны с системами разрывных нарушений. Нарушения – проявление физических

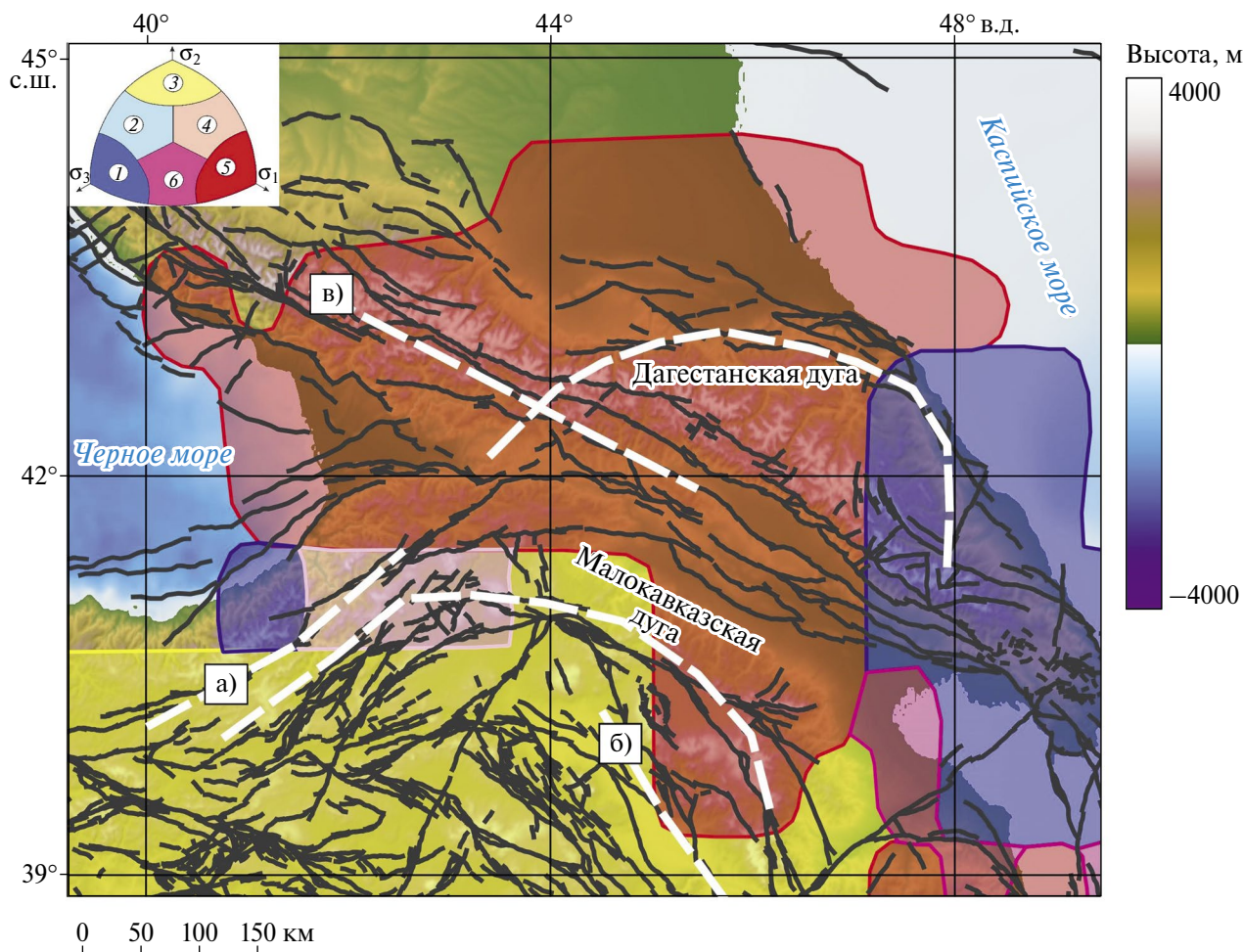


Рис. 3. Схема активных разломов Кавказа по работам [Бачманов и др., 2017; Zelenin et al., 2022] и районирование по геодинамическому типу напряженного состояния, построенного по каталогу механизмов очагов Global CMT [Ребецкий, 2020]. В верхнем левом углу показаны типы напряженного состояния: 1 – горизонтальное растяжение; 2 – горизонтальное растяжение со сдвигом; 3 – горизонтальный сдвиг; 4 – горизонтальное сжатие со сдвигом; 5 – горизонтальное сжатие; 6 – вертикальный сдвиг. Буквами и белыми пунктирными линиями показаны направления простираения систем разрывов для трех провинций – а), б), в).

закономерностей, обусловленных стремлением среды ослабить механическое воздействие тектонических сил. Поэтому структура разломов, их тип и другие характеристики являются ключевыми аргументами при анализе деформаций и напряженно-деформированного состояния. Системы разломов Большого и Малого Кавказа начали формироваться на герцинском этапе, но большинство из них было заложено еще в мезозое, согласно работе [Большой..., 2007]. В современном виде структура разломов оформилась уже в голоцене и характеризуется преимущественным западо–северо-западным простираением.

В работе [Adamia et al., 2011] по простираению тектонических разломов Кавказа территория делится на три области (рис. 3):

а) юго-западная часть Малого Кавказа – в основном, разломы сдвигового характера, ориентированные по азимутам 220–250°;

б) юго-восточная часть Малого Кавказа – разломы сдвигового характера, ориентированные по азимутам 120–160°;

в) северная часть – преимущественно надвиговые разломы, ориентированные параллельно хребту Большого Кавказа с азимутами 100–120°.

На рис. 3 эти области обозначены, соответственно, а), б), в). Аналогичный характер альпийских разрывов Кавказа описан в работе [Расцветаев, 1973]. Разрывы субширотного простираения охарактеризованы как надвиги, северо-западного простираения – как правые сдвиги, северо-восточного – как левые сдвиги, а субмеридиональные разрывы – как раздвиги (рис. 3).

У большинства разломов центральной части Кавказского хребта плоскость наклонена на юг под углом от 45 до 80° [Сафаров, Вахабов, 2018]. На рис. 3 приведен фрагмент карты активных разломов Евразии [Бачманов и др., 2017; Zelenin et al., 2022], которая несколько отличается от приведенной на рис. 1а. На рис. 3 четко прорисована Малокавказская тектоническая дуга, образованная системой сдвигов северо-восточного и северо-западного простирания [Большой..., 2007]. Вероятно, это результат давления клина Аравийской плиты, создающего сдвиговые разрывы, аналогичные трещинам сдвига при разрушении образцов горных пород.

Сейсмичность

Работы по сейсмотектоническому районированию подтверждают пространственную взаимосвязь очагов землетрясений с разломами как “общекавказского”, так и “антикавказского” направлений. Для пространственной оценки распределения землетрясений был использован каталог Кавказа с древнейших времен (-550 г.) по 2000 г., содержащий параметры

очагов 2739 землетрясений с магнитудой $M > 4.0$ (энергетическим классом $K > 11.0$) [Годзиховская, 2000], размещенный на сайте Мирового центра данных по физике твердой Земли.

На рис. 4 показано распределение землетрясений с $M > 4.0$. Даже визуально можно заметить общие закономерности распределения землетрясений на территории Большого и Малого Кавказа:

- 1) практически отсутствие сильных ($M > 6.0$) землетрясений в Западной части Большого Кавказа;
- 2) приуроченность сильных землетрясений Малого Кавказа к двум системам “антикавказских” сдвигов;
- 3) приуроченность сильных сейсмических явлений Большого Кавказа к линейной зоне его южного склона;
- 4) полное отсутствие сильных глубоких землетрясений;
- 5) агломерация сильных землетрясений к районам малой Кавказской и Дагестанской тектонических дуг.

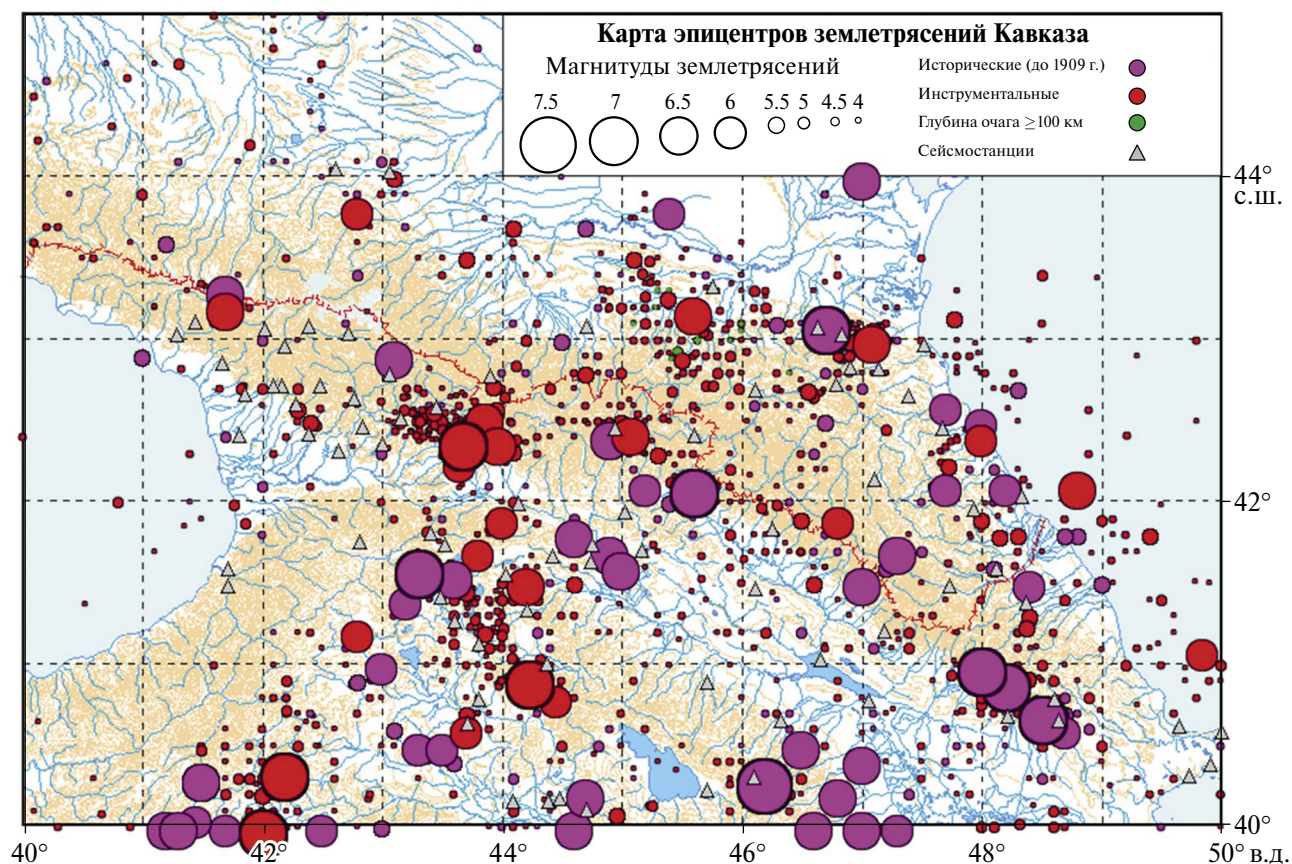


Рис. 4. Землетрясения Кавказа с $M > 4.0$ с древнейших времен по 2000 г. по работе [Годзиховская, 2000].

Геофизические поля

На рис. 5а приведена карта аномалий силы тяжести из работы [Kaban et al., 2021]. Положительные гравитационные аномалии говорят о наличии подповерхностной массы, а отрицательные — о ее дефиците. В той же работе показана карта глубины залегания границы Мохо, по которой происходит скачкообразное увеличение скоростей продольных сейсмических волн с 6.7–7.6 до 7.9–8.2 км/с и поперечных — с 3.6–4.2 до 4.4–4.7 км/с.

Таким образом, карты зеркально отражают друг друга. В работе [Тап, Таумаз, 2006] утверждается, что мощность сейсмогенерирующего слоя на Кавказе не превышает 20 км, т.е. большинство землетрясений происходят в верхнем слое земной коры, имеющем меньшую плотность. Этот менее плотный слой физически легче деформируется, но силовую нагрузку лучше передает более консолидированная часть литосферы, находящаяся ниже. Сравнение распределения сильных ($M > 6.0$) землетрясений (рис. 4) и геофизических полей (рис. 5) показывает, что большинство сейсмических явлений непосредственно связано с зонами наибольших градиентов гравитационных аномалий.

Напряженно-деформированное состояние

По мнению большинства геологов, напряженно-деформированное состояние земной коры определяется процессом латерального сжатия вкрест простирания структур Большого Кавказа. Однако анализ структурного рисунка тектонических элементов Большого Кавказа, проведенный Н.В. Лукиной, показал, что картина немного сложнее [Лукина, 1983]. Субширотные надвиги, как правило, имеют левосдвиговую составляющую, а субмеридиональные раздвиги — правосдвиговую. Правосторонние сдвиги Большого Кавказа северо-западного простирания характеризуются также и надвиганием, а северо-восточные левосторонние сдвиги представляют собой флексуры, ступени, сбросы, т.е. носят черты явного растяжения. Эти данные позволили автору сделать предположение о том, что тензор напряжений для Большого Кавказа претерпел изменение во времени [Лукина, 1983]. Сначала территория испытывала давление с юго-запада и сжатие было ориентировано в северо-восточном направлении (рис. 6). В этих условиях формировались надвиги северо-западного и раздвиги северо-восточного

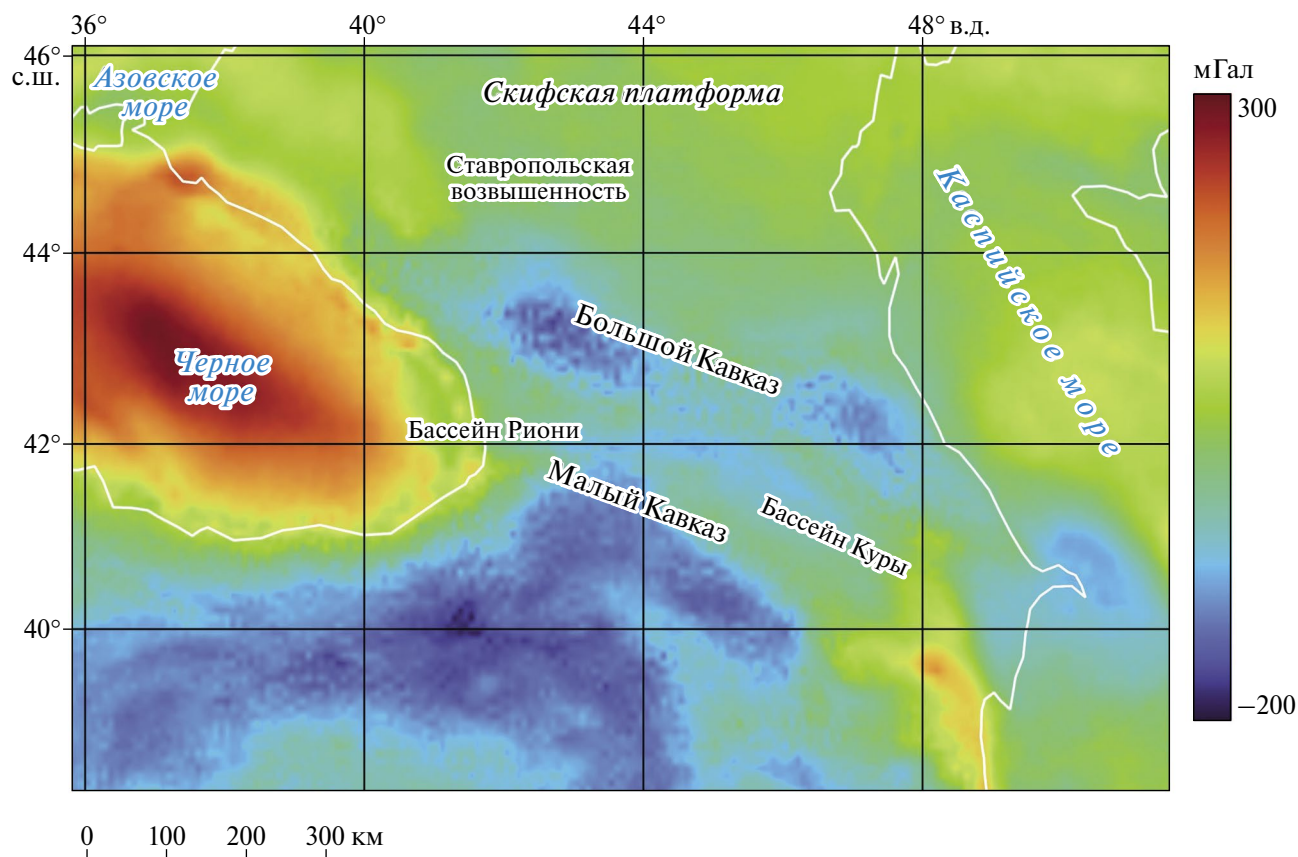


Рис. 5. Карты гравитационных аномалий [Kaban et al., 2021].

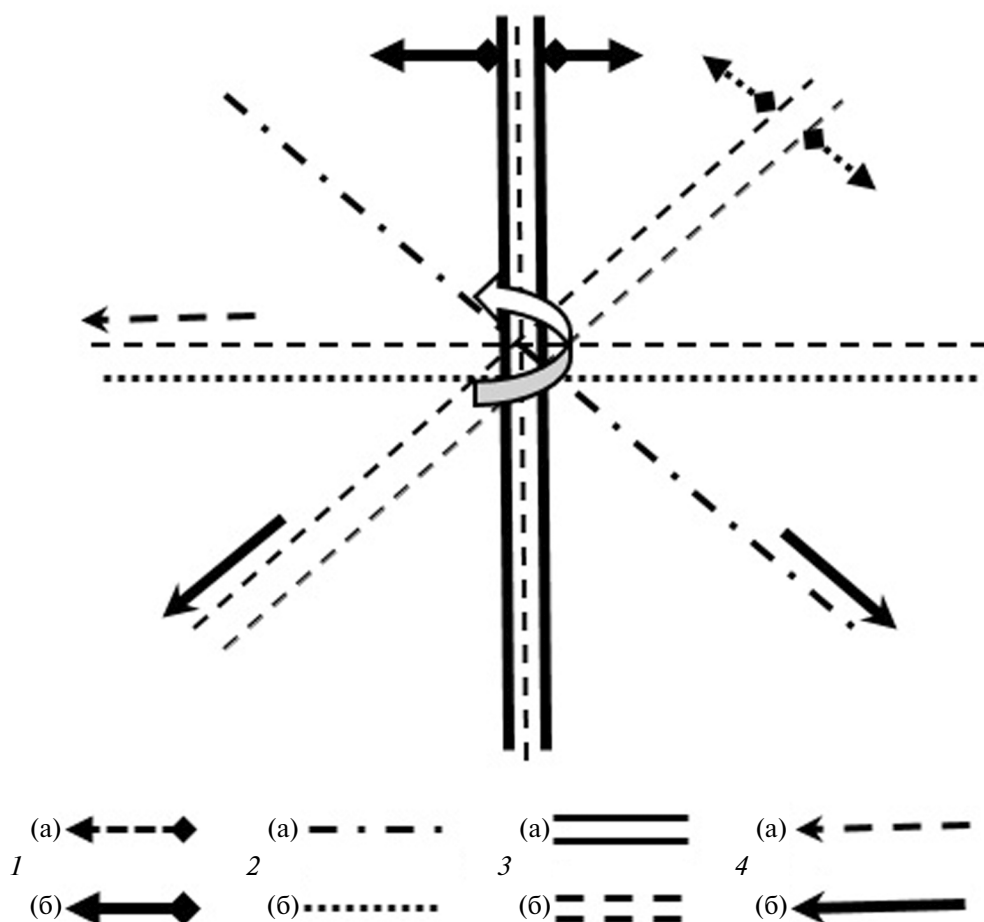


Рис. 6. Изменение поля напряжений Большого Кавказа в новейшее время [Лукина, 1983]: 1 – направления тангенциального сжатия: (а) – более ранние, (б) – более поздние; 2 – надвиги: (а) – более ранние, (б) – более поздние; 3 – раздвиги: (а) – более ранние, (б) – более поздние; 4 – направления смещения: (а) – более ранние, (б) – более поздние. Сдвиги имеют азимут простираия 315–330°; левые сдвиги – около 45°, надвиги и взбросы – 270–280°, раздвиги – 0–10°.

простираия. Субширотные разрывы представляли собой левосторонние сдвиги, а субмеридиональные разрывы – правосторонние. Затем произошла смена северо-восточного тангенциального сжатия на субмеридиональное. Северо-западные надвиги приобрели правосдвиговую составляющую, северо-восточные раздвиги – левосдвиговую. Субширотные левосторонние сдвиги трансформировались в надвиги, а субмеридиональные правосторонние сдвиги превратились в зоны растяжения.

Возможно, поворот поля напряжений связан с изменением вектора движений Аравийской плиты. Тогда можно объяснить приуроченность районов высокой сейсмической активности к тектоническим разрывам северо-западной и субширотной ориентировки, представляющим собой структуры надвигания на более раннем

и более позднем этапах новейшего развития Кавказа [Лукина, 1983].

Другим способом восстановления поля напряжений является изучение фокальных механизмов очагов сильных землетрясений [Тап, Таумаз, 2006; Ребецкий, 2020; и др.]. На рис. 7 приведены решения фокальных механизмов землетрясений (полученных с помощью сервиса “Centroid Moment Tensors” международного исследовательского института сейсмологии [Trabant et al., 2012]), а также основные направления главных осей (без масштаба). Видны две главные особенности: поворот осей сжатия на восток при движении с юга на север и деление территории по распределению осей напряжений на Закавказье, Восточный Кавказ, западную и центральную части Большого Кавказа и Дагестан.

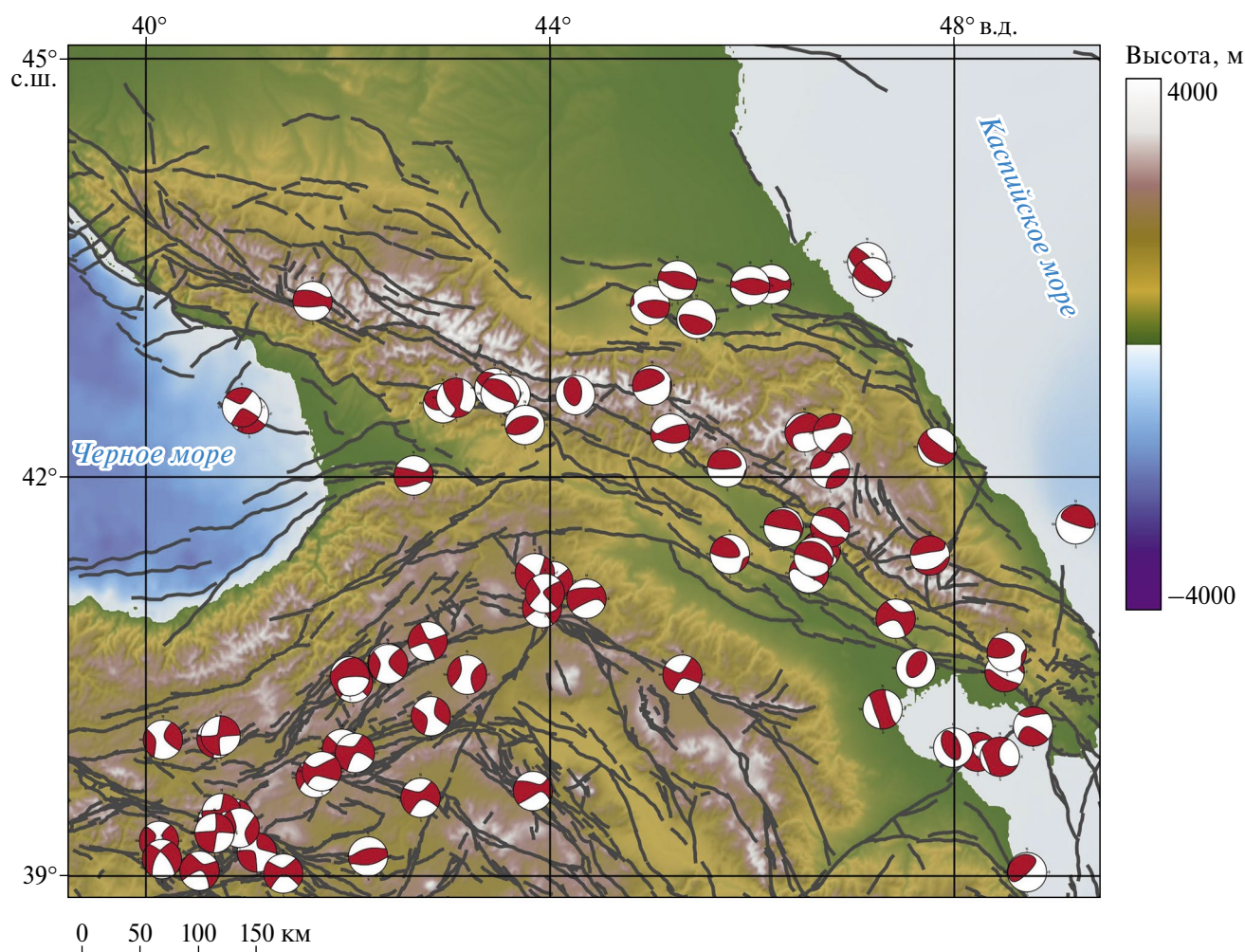


Рис. 7. Распределение решений для фокальных механизмов очагов сильных землетрясений на Кавказе, полученных с помощью сервиса CMT Международного исследовательского института сейсмологии [Trabant et al., 2012].

Для Большого Кавказа, в целом, преобладает резко выраженный надвиговый тип сейсмотектонической деформации при горизонтальной ориентации главной оси сжатия и вертикальной ориентации главной оси растяжения. Напряжение горизонтального сжатия ориентировано в азимутальном секторе северо–северо-восток, поперек горных хребтов. В центральной части Большого Кавказа векторы скольжения направлены примерно на север. В восточной части оси ориентированы по азимуту $\sim 30^\circ$ на северо-восток.

На юге картина существенно отличается в сторону преобладания сдвигового типа сейсмотектонических деформаций. Причем на западе азимут тектонических усилий $\sim 330^\circ$ с образованием левосторонних сдвигов, а в центральной части — правосторонних. В восточной же зоне, прилежащей к берегу Каспийского моря,

вектор усилий резко меняет направление на восточное.

Этот результат очень близок к распределению главных осей сжатия фокальных механизмов, приведенному в работе [Лукк, Шевченко, 2019], за исключением юго-восточной части, по которой нет данных. Аналогичная зональность в полях напряжений отмечена Л.М. Расцветаевым [Расцветаев, 2002].

На рис. 3 приведены результаты районирования земной коры региона по интенсивности нормированных напряжений наименьшего и наибольшего напряжения горизонтального сжатия. Районирование выполнено методом катакластического анализа сейсмологических индикаторов деформаций Ю.Л. Ребецкого. В качестве исходных данных использована информация о механизмах очагов землетрясений из каталога “*Global CMT Project*” (<http://www.globalcmt.org/>) [Ребецкий, 2020].

Результаты расчетов механизмов показали, что в земной коре существует три крупных области с резко различающимися кинематическими типами механизмов очагов землетрясений. В южной части преобладают сдвиговые механизмы в очагах землетрясений в условиях горизонтального сдвига; северная часть, совпадающая с Главным Кавказом, находится, преимущественно, в условиях горизонтального сжатия; восточная часть — в условиях горизонтального растяжения.

Горизонтальные движения, полученные средствами ГНСС

Период изучения горизонтальных движений на Кавказе средствами ГНСС составляет примерно 30 лет. Первые GPS-наблюдения на территории Кавказа были проведены сотрудниками ИФЗ РАН при участии американских специалистов после Рачинского землетрясения (29.04.1991 г., $M_s = 7-7.2$) — сильнейшего из инструментально зарегистрированных сейсмических событий на Западном Кавказе [Reilinger et al., 1997; Прилепин и др., 1997]. Затем были реализованы крупномасштабные международные проекты по проведению полевых ГНСС-кампаний [McClusky et al., 2000; Reilinger et al., 2006; Шевченко и др., 1999; Галаганов и др., 2013; Кадыров, Сафаров, 2013; Кадыров и др., 2017; и др.], заложены постоянные ГНСС-станции [Милюков и др., 2015], многократно осуществлялись локальные наблюдения в разных частях Кавказского региона. Старейшей из непрерывных станций является станция ZECK Зеленчукской обсерватории ИПА РАН, накапливающая определения координат с 1997 г.

Однако эти проекты отличались крайней эпизодичностью, масштабом и охватом различных частей Кавказа, а также различными подходами авторов к интерпретации результатов, что приводило к неоднозначной трактовке о направленности и величинах современных движений. В этой связи анализ результатов геодезических наблюдений за вертикальной и горизонтальными компонентами современных движений совместно с общими закономерностями тектогенеза Большого Кавказа будет полезен для оценки сейсмической опасности. Детальному обобщению результатов наблюдений за динамикой горизонтальных движений будет посвящена отдельная статья.

Для иллюстрации горизонтальных движений приведем рисунок, необходимый для обсуждения модели деформирования земной коры в пределах Кавказа. На рис. 8 показаны векторы

горизонтальных движений в регионе, построенные по результатам ГНСС-наблюдений [Ahadov, Jin, 2017]. Помимо отмеченного выше раздвоения направления горизонтальных движений, видна все та же общая картина: разделение территории Кавказа на три области. Северная часть, за пределами хребта Большого Кавказа, характеризуется самыми низкими абсолютными значениями движений с направлением преимущественно на северо-восток. Для территории, лежащей на юге от хребта: западная часть характеризуется северными азимутами горизонтальных смещений; для восточной части направления движений меняются на северо-восточные.

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ И КАРТЫ СОВРЕМЕННЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

В предыдущие годы незаслуженно мало уделялось внимания вертикальной компоненте СДЗК на территории Кавказа. Авторы, главным образом, ограничивались определением скоростей горизонтальных движений в глобальной системе координат и укорачиванием земной коры. Вероятно, причиной тому являлась низкая точность определения вертикальной компоненты средствами ГНСС и увлечение плейтектоническими гипотезами [Philip et al., 1989; McClusky et al., 2000; Tibaldi et al., 2019; Ismail-Zadeh et al., 2020].

Высокоточное геометрическое нивелирование, являющееся высотной основой разных государств, стало первым измерительным средством во многих национальных и международных программах определения вертикальных СДЗК. Главным образом, благодаря развитию и применению этого метода, в 1963 г. в составе Международной ассоциации геодезии начала функционировать специальная комиссия VII “Современные движения земной коры”, создателем и первым президентом которой являлся советский географ и геодезист Ю. Мещеряков. Именно он впервые сформулировал модель геодезического предвестника землетрясения по данным повторного высокоточного нивелирования и фазы его проявления [Mescherikov, 1968].

Первые упоминания о возможностях регистрации вертикальных движений земной коры методом повторного точного нивелирования принадлежат российским военным топографам позапрошлого столетия. Это послужило толчком для регламентирования сроков повторения измерений по линиям национального

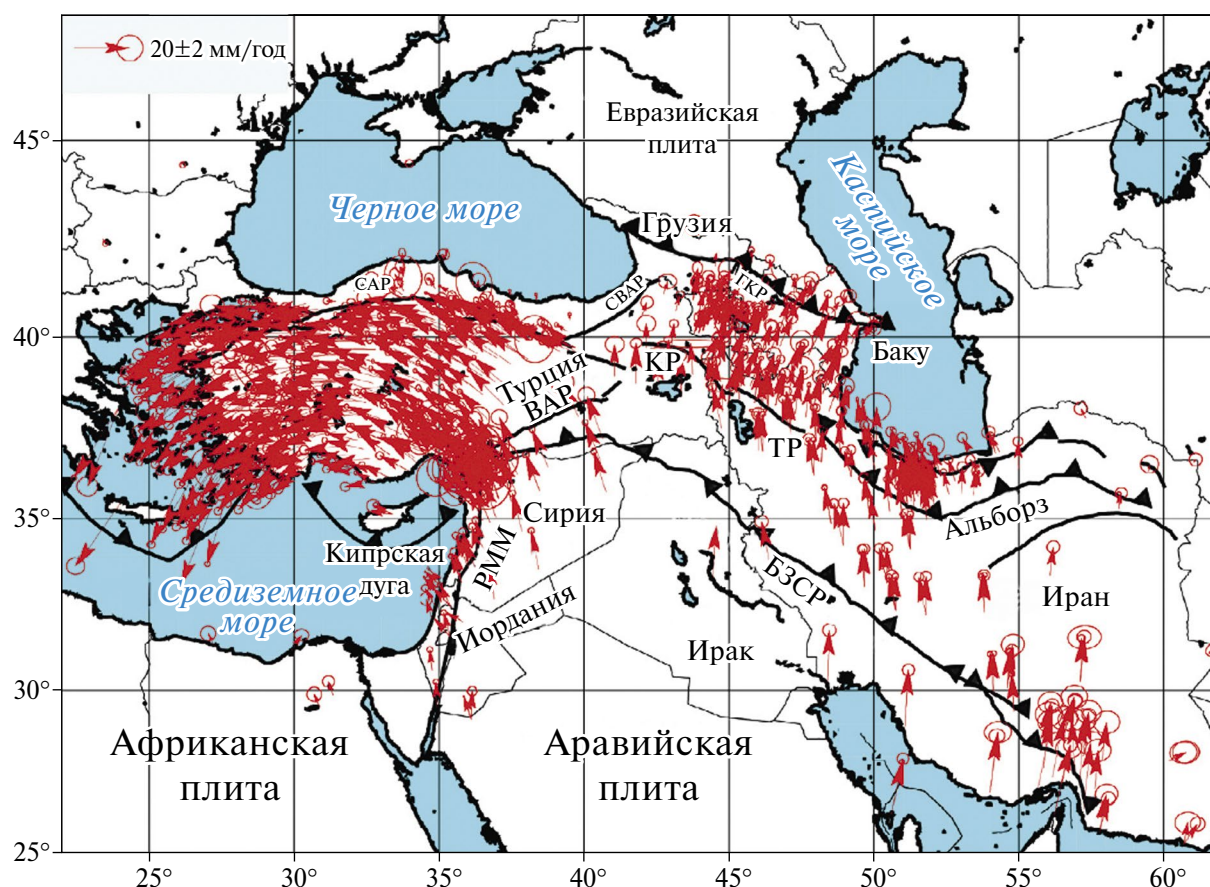


Рис. 8. Векторы горизонтальных движений в регионе, построенные по результатам ГНСС-наблюдений относительно закрепленной Евразийской плиты по работе [Ahadov, Jin, 2017]: CAP – северо-Анатолийский разлом; ВАР – восточно-Анатолийский разлом; СВАР – северо-восточный Анатолийский разлом; ГКР – главный Кавказский разлом; КР – Кавказский разлом; ТР – Табризский разлом; РММ – разломов Мертвого моря; БЗСР – Битлис-Загрос система разломов.

нивелирования. С целью ослабления “старения” высот реперов государственного нивелирования устанавливались интервалы времени, по истечению которых нивелирование необходимо было повторять. До последних десятилетий точное нивелирование осуществлялось оптическими нивелирами с горизонтальными цилиндрическими уровнями. Ниже анализируются результаты определения вертикальных движений земной коры именно спиртовыми нивелирами.

В национальном нивелировании Российской Федерации [Инструкция..., 2004] установлены интервалы повторения государственного нивелирования I и II классов через 24 и 30 лет соответственно. Для сейсмоактивных районов, где происходят наиболее быстрые движения, предусмотрены соответствующие повторения один раз в 15 и 25 лет.

Точность определения превышений по линиям государственного нивелирования СССР

I и II классов характеризуется значениями порядка 1.5–2.5 мм/км [Кафтан, 1996]. Это обстоятельство говорит о высокой степени однородности точности национального государственного нивелирования.

Важным фундаментальным научным результатом точного геометрического нивелирования являются карты вертикальных СДЗК. Важнейшим достоинством картографической модели является ее значительный пространственный охват, а естественным недостатком – малое число повторных измерений по линиям нивелирования. Основная трудность решения задачи связана с пространственно-временной нерегулярностью данных, которая обусловлена объективной сложностью измерений по протяженным линиям с равными интервалами повторений и необходимостью расположения репера этих линий на равноудаленных друг от друга расстояниях. Информация о картах вертикальных СДЗК, использованных в настоящей работе,

выложена на сайте Мирового центра данных по физике твердой Земли (http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/data/lists/list6_2.html, дата обращения 25.01.2024). Качество карт детально рассмотрено в работе [Кафтан, 1996]. Статистические исследования циклов нивелирования, послуживших основой для создания карт Европейской части СССР, показали значимую положительную корреляцию ошибок (невязок нивелирных полигонов) разных эпох [Loskutov et al., 1988]. Это может свидетельствовать о существовании односторонне действующих ошибок в повторных измерениях, равно как и об их ослаблении в разностях измерений разных эпох.

Территорию Кавказа охватывают несколько карт. Первой, из официально изданных карт, является “Карта современных вертикальных движений Восточной Европы” [Карта..., 1971; 1973] (рис. 9). Начальная и конечная эпохи повторного нивелирования изменялись в пределах

1925–1937 гг. и 1946–1950 гг. соответственно. Позднее на XVI Генеральной ассамблее IAG/IUGG был представлен доклад, уточняющий содержание этой карты [Meschersky, Korokina, 1975]. К этому времени была успешно завершена принятая в 1968 г. государственная программа развития нивелирования I и II классов на территории СССР. При вычислении скоростей вертикальных движений особое внимание было уделено Кавказскому региону. Полная длина линий нового повторного нивелирования Кавказа составила 3.2 тысячи км. Это обеспечило определение скоростей движений по 266 новым нивелирным знакам. На этой карте впервые было зафиксировано по инструментальным геодезическим данным интенсивное поднятие территорий Большого Кавказского хребта.

Вторая картографическая модель вертикальных СДЗК “Карта современных вертикальных движений земной коры на территории Болгарии,

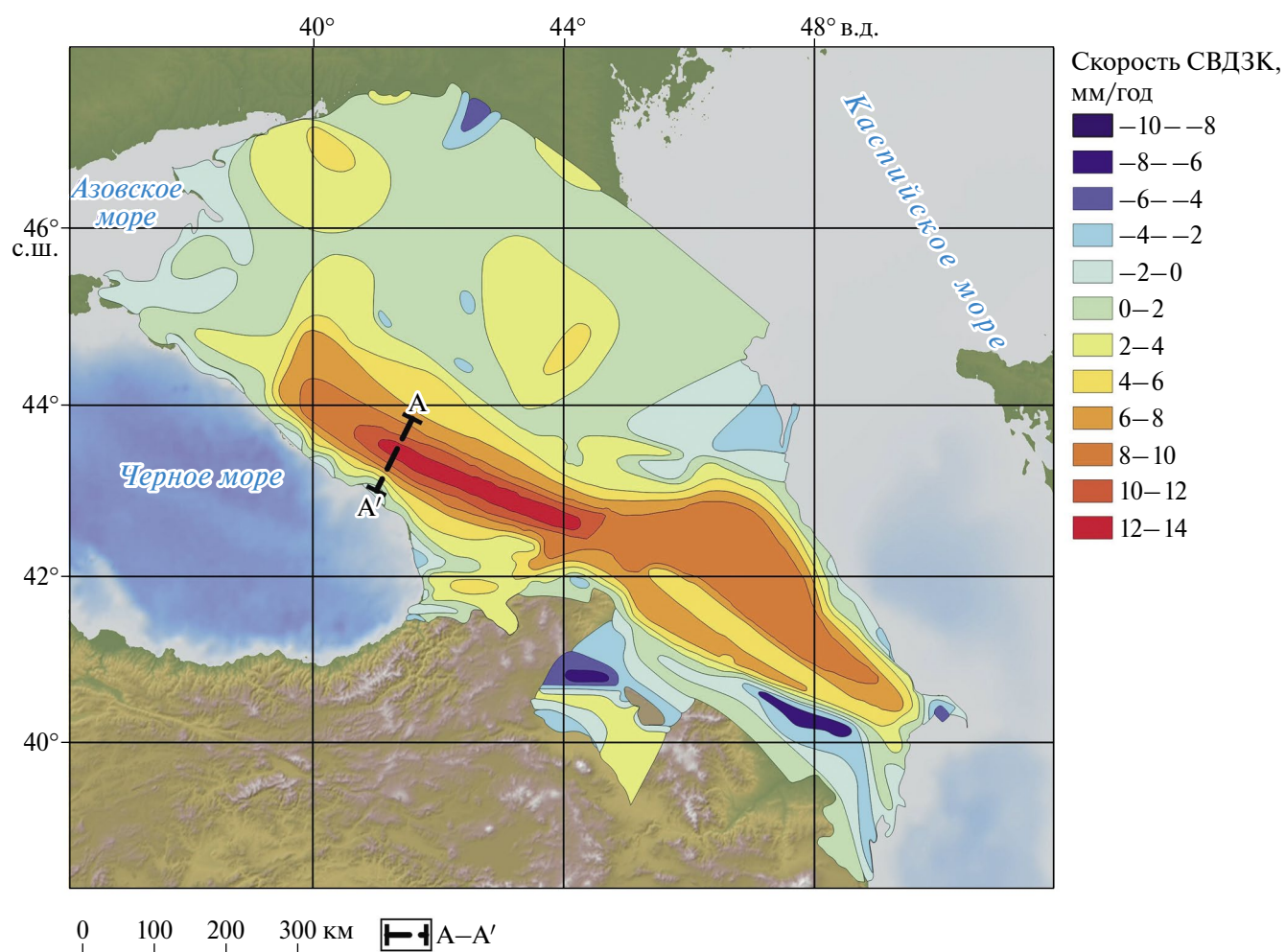


Рис. 9. Первый подъем Большого Кавказа и последующие (1925/37–1946/50 гг.) (см. [Карта..., 1971; 1973]). А–А' – профиль геометрического нивелирования Зеленчук–Сухуми (см. рис. 12).

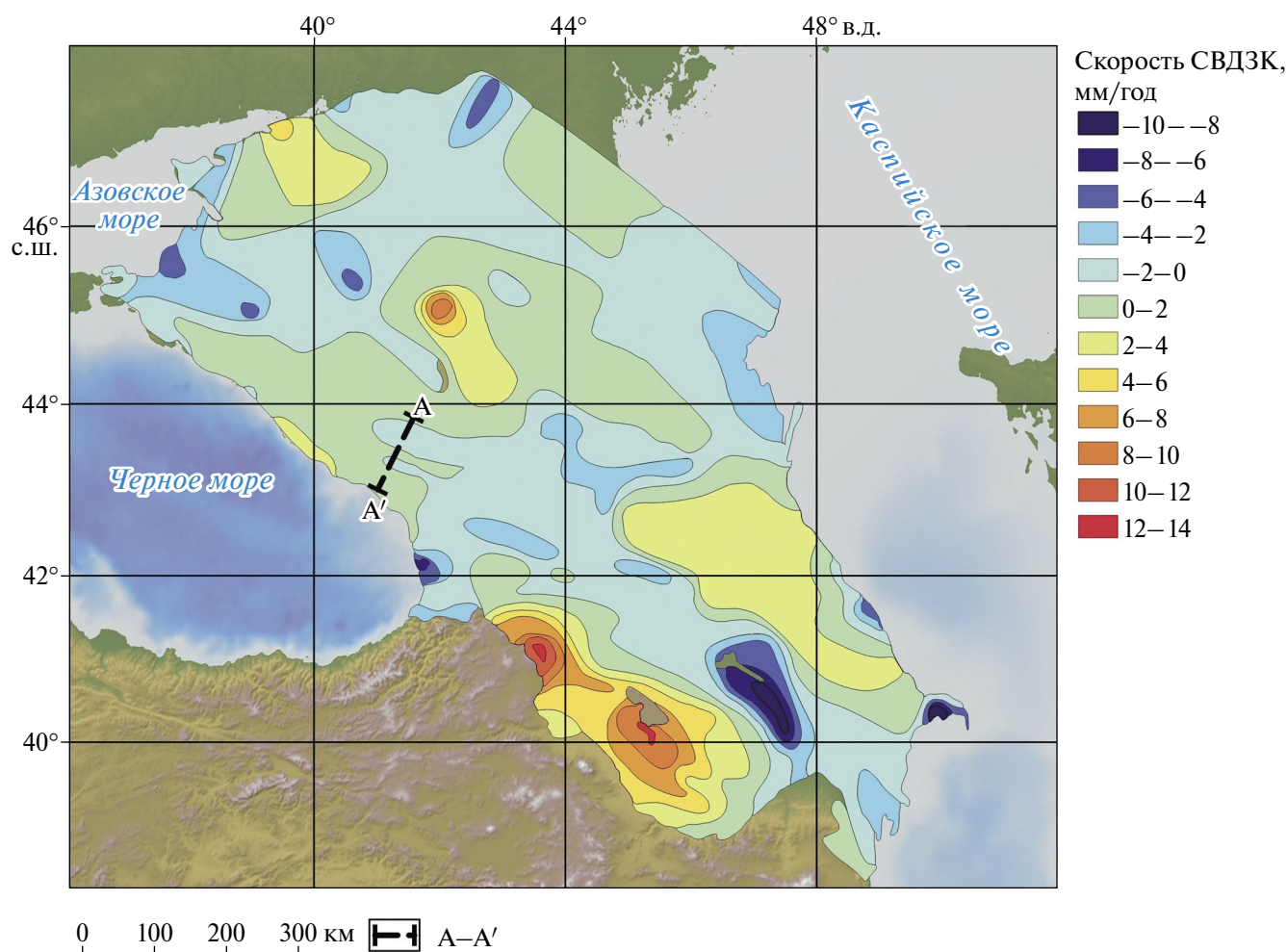


Рис. 10. Подъем Малого Кавказа, период затишья подъема Большого Кавказа (1946/50—1970/75 гг.) [Карта..., 1986]. А—А' — профиль геометрического нивелирования Зеленчук—Сухуми.

Венгрии, ГДР, Польши, Румынии, СССР (Европейская часть), Чехословакии» [Карта..., 1986] показана на рис. 10. Вертикальные движения были определены в результате цикла нивелирования, выполненного в цикле нивелирования 1970—1975 гг. Независимо от зарубежных территорий была составлена [Карта..., 1989]. На этих двух картах информация о вертикальных движениях Кавказа была одинаковой.

Третий результат определения вертикальных движений Кавказа отражен на «Карте вертикальных движений земной поверхности Прикаспийского региона» [Кафтан и др., 1995; Кузнецов и др., 1997]. Здесь вертикальные движения были определены в результате цикла нивелирования, выполненного в 1985—1992 гг. Скорости вертикальных движений были определены по двум последним циклам измерений (рис. 11). Средний интервал времени между циклами повторных измерений составил около 30 лет.

Точность определения скоростей вертикальных движений трех указанных карт однородна и изменяется в пределах 0.2—2.6 мм/год.

На территории Кавказа по данным нивелирования перед сильными землетрясениями выявлены аномальные подъемы земной поверхности [Kaftan, 1996]. К ним относятся три эпизода поднятий, произошедших в Кавказском регионе: два на территории Большого Кавказа (рис. 9, рис. 11) и одно на Малом Кавказе (рис. 10) вблизи эпицентра Спитакского землетрясения с $M = 6.9$, произошедшего 07.12.1988 г.

Можно видеть, что подъемы характерны для положительных форм рельефа, тогда как в межгорных впадинах наблюдаются опускания. Территория Апшеронского полуострова также испытывает опускания, которые объясняются добычей в этом районе углеводородов. На всех картах очевидны различия в охвате поднятиями территорий запада и востока Большого Кавказа,

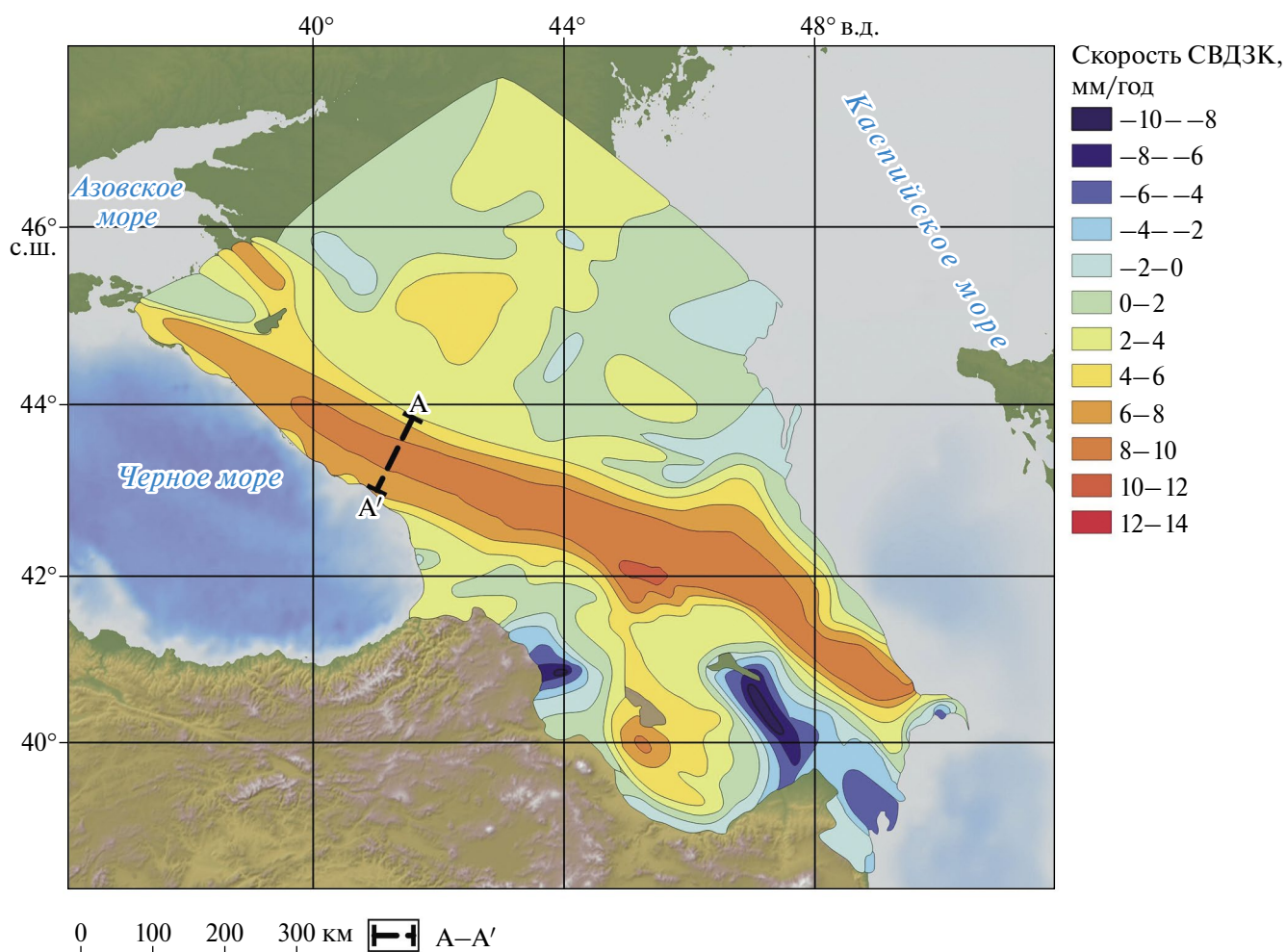


Рис. 11. Второй подъем Большого Кавказа (1970/75–1985/92 гг.) [Кафтан и др., 1995]. А–А' – профиль геометрического нивелирования Зеленчук–Сухуми.

что отмечается в различии геодинамики этих областей [Philip et al., 1989].

Кроме нивелировок государственного назначения, на Кавказе выполнялись и другие работы прикладного характера, не участвующие в составлении карт вертикальных движений земной коры. Обстоятельные исследования, например, представлены в работе [Сидоров, Кузьмин, 1989]. В работе приведены результаты исследования вертикальных движений в северо-восточной части региона, включая Терско-Каспийский прогиб. Был сделан вывод о существовании автоколебательного характера процессов деформирования в разломных зонах, а также приведена количественная модель взаимосвязи поднятий земной поверхности с процессом подготовки землетрясений.

В работе [Гурбанов и др., 2023] представлена попытка оценки вертикальных движений земной коры Большого Кавказа по данным

исследований Российско-Германского проекта WEGENR [McClusky et al., 2000] с целью оценки современных геотектонических концепций. При этом были использованы повторные ГНСС-измерения 1993 и 1994 гг. Этот период времени практически продолжает временной интервал исследований, отраженных на третьей карте (рис. 11). Эти независимые исследования с использованием качественно иного геодезического метода показали результаты, очень близкие к результатам точного нивелирования. При этом авторы выделяют зону Транскавказского поперечного поднятия, испытывающего подъем со скоростью порядка 1 см/год, как более подвижную.

В XXI столетии оценки вертикальных движений на Кавказе осуществлялись в рамках локальных и непродолжительных исследований. В работе [Милюков и др., 2015] оценены скорости вертикальных движений в Центральном

Кавказе на станциях Зеленчук (ZECK), Кисловодск (KISL), Владикавказ (VLKK), Терскол (TRSK). За периоды времени 2007–2013 гг. (KISL), 2005–2014 гг. (TRSK), 2008–2014 гг. (VLKK) получены скорости подъемов +3.6, +4.4, +2.5 мм/год соответственно. Наибольшую скорость подъема демонстрирует станция TRSK, ближе всех расположенная к оси Большого Кавказского хребта. Таким образом, в этот период подъем Большого Кавказа в его центральной части продолжался.

Д.А. Лилиенберг предполагал, что, хотя на картах отражена только вертикальная компонента, линейные продольные зоны попеременных поперечных поднятий и опусканий могут рассматриваться как результат циклических поперечных сжатий и растяжений при возвратно-наступательном механизме горизонтальных движений [Лилиенберг, 1980] (об этом будет сказано ниже по данным ГНСС-наблюдений). Для Кавказа автор связывал его с импульсным давлением выступа Аравийской плиты на Альпийский орогенный пояс. Это соответствует структуре тектонических нарушений и полям напряжений, приведенным выше.

Для территории Северного Кавказа в 2005–2019 гг. по данным ГНСС были получены оценки вертикальных движений [Гурбанов и др., 2023]. Из-за малого территориального охвата региона, в целом детально сопоставить результаты с исследованиями прошлого столетия весьма сложно. Тем не менее, имеются основания говорить о максимальных скоростях движений до +4 мм вблизи центральной части Большого Кавказского хребта. Современные данные ГНСС-наблюдений позволяют предполагать продолжение

умеренного подъема земной коры в отдельных локальных частях региона в XXI столетии.

Таким образом, за рассматриваемый период Большой Кавказский хребет испытывал интенсивные поднятия дважды, прерывающиеся эпохой затишья. Для лучшего и детального представления об этом явлении приводится отдельная линия точного нивелирования Зеленчук–Сухуми, повторенная трижды и пересекающая Большой Кавказский хребет (рис. 12).

Интересным фактом, свидетельствующим о существовании связи между аномальными подъемами земной поверхности в разных регионах мира и сильными землетрясениями, является их расположение в пределах и в непосредственной близости (в высокоградиентных зонах перехода от опусканий к подъемам) от территорий аномальных поднятий [Mescherikov, 1968]. В то же время имеются области аномальных поднятий, за которыми землетрясений не последовало. Таким районом является Ставропольское поднятие, обособленное от подъема Большого Кавказа (рис. 11), расположенное на Скифской плите. Обращает на себя внимание тот факт, что в 1921 г. в пределах этого района произошло сильное землетрясение с $M \sim 6.0$. Эти обстоятельства заставляют считать указанный район сейсмически опасным.

Анализ имеющихся в нашем распоряжении данных позволил выявить как сходства, так и отличия протекания деформационных и сейсмических процессов на Кавказе по отношению к подобным случаям в других регионах мира. Косейсмический подъем земной коры в связи с мощным землетрясением 22.04.1991 г. в Коста Рике описан в работе [Plafker, Ward, 1992].

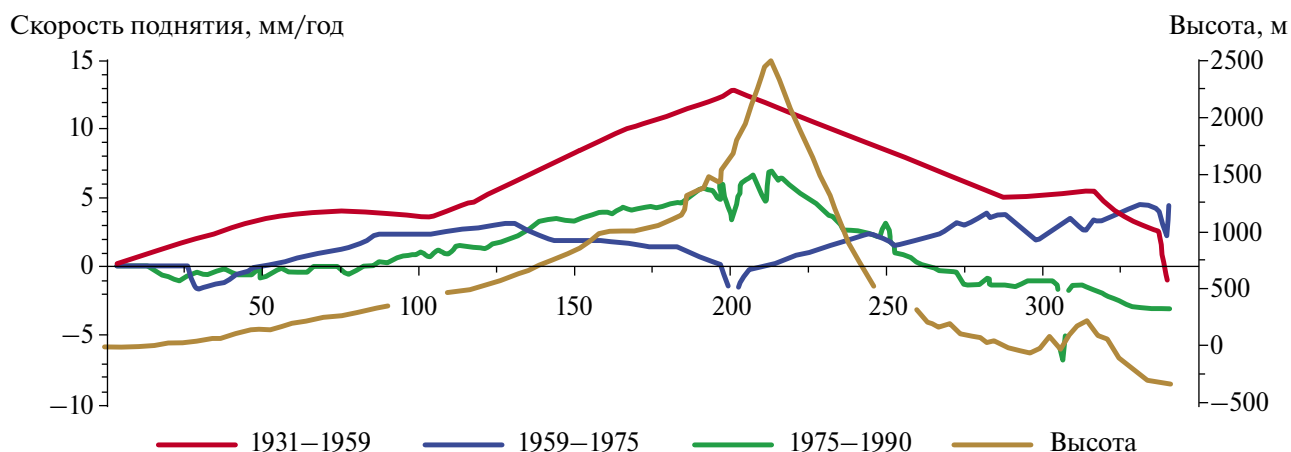


Рис. 12. Скорости вертикальных движений по линии нивелирования Зеленчук–Сухуми. Жирная коричневая линия — рельеф; красная, синяя и зеленая линии — графики изменения скоростей вертикальных движений для разных интервалов времени.

Косейсмические подъемы в результате мегаземлетрясений в зонах субдукции Аляски (1964) и Чили (1960) рассмотрены в статье [Plafker, 1972]. Несколько событий аномальных подъемов зарегистрировано на Японском архипелаге. В работе [Fujii, Xia, 1993] с использованием авторского метода обработки повторного нивелирования показано, что в регионе Токай происходит согласованное взаимное перемещение подъема и опускания земной коры. Подъемы земной коры рассматриваются как среднесрочные предвестники сильного сейсмического события в публикации [Seno, 2004]. Автор показывает, что подъемы земной коры в районе происходят примерно за десятилетие до сильных землетрясений. Причиной тому является процесс субдукции Филиппинской тектонической плиты под Евразийскую плиту со скоростью 4–5 см в год.

Регион Тохоку, где произошло сильнейшее землетрясение последнего столетия, также подвергнут изучению вертикальных движений земной коры. Авторами показано, что с 1966 по 1995 гг. существует устойчивый межсейсмический наклон района в сторону Японского желоба и подъем в его юго-западной части [El-Fiky et al., 1997]. Такая аномалия согласуется с геодинамической моделью процесса субдукции. Вблизи исследуемой области произошло два сильных землетрясения: 1983 г. Nihonkai-chubu ($M7.7$) и 1978 г. Miyagi-oki ($M7.4$). Один случай аномального подъема произошел на западном побережье Канады в районе о-ва Ванкувер [Dragert, Lisovski, 1989], два случая произошли в начале и во второй половине нашего столетия в Южной Калифорнии [Castle, Simpson, 1988].

Основным отличием является то, что территории охвата аномальными деформациями земной поверхности Кавказа значительно больше, например, территорий аномальных деформаций в Северном Китае [Wu et al., 1996]. В сейсмоактивных регионах Китая нивелирование повторяется с интервалами 1–5 лет. Это в 5–10 раз чаще, чем в странах бывшего СССР и Восточной Европы. В то время как в Китае каждое поднятие связано только с одним сильным землетрясением [Wu et al., 1996], на Кавказе поднятия сопровождались несколькими землетрясениями. При этом необходимо подчеркнуть, что в некоторых регионах бывшего СССР, например, в Туркменистане повторные нивелирные наблюдения проводились с меньшим временным интервалом — от 1 раза в год по протяженным (50–100 км) до 1 раза в месяц по локальным (5–10 км) профилям [Кузьмин, 2021].

Безусловно, частые повторные измерения и более плотная сеть обеспечивают большую детальность описания вертикальных деформаций. Возможно, что общее поднятие Большого Кавказского хребта [Карта..., 1971; 1973] сформировано более локальными экстремумами, отвечающими за подготовку конкретного землетрясения и при генерализации информации, отображенной на мелкомасштабной карте, они оказались выраженными в виде общего регионального поднятия. В научной литературе имеются случаи, когда одно общее поднятие состоит из двух локальных, например: Палмдейлское [Castle, Simpson, 1988] в Южной Калифорнии или Спитакское, у которого второй локальный экстремум расположен вблизи озера Севан [Karapetyan et al., 2020]. Известны случаи миграции поднятий [Fujii, Xia, 1993], периодичности их образования и релаксации напряжений, приводящей к коллапсу поднятия [Castle, Simpson, 1988].

На рис. 13 приведены графики изменения скоростей вертикальных движений южного и северного склонов Большого Кавказа по данным В.Н. Шолпо в течение всего альпийского цикла [Шолпо, 1978]. Видно, что, начиная с позднего палеогена, скорость воздымания Большого Кавказа увеличивается, приблизительно, с 0.025 до 0.1 мм/год. Если согласиться с гипотезой об унаследованности современных движений, то этот график подтверждает зарегистрированный по результатам нивелирования подъем Кавказа. Абсолютные значения скоростей по геологическим данным за интервал 20 млн лет отличаются на 2–2.5 порядка от результатов ГНСС-измерений. Это соответствует коэффициенту пересчета, учитывающего масштабный временной эффект между геологическими и геодезическими данными [Гзовский, 1975; Татаринов, 2006].

МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ КАВКАЗА НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Геодинамическую модель Большого Кавказа на новейшем этапе наиболее емко сформулировал Ю.Г. Леонов: “Большой Кавказ — это резко очерченный линейный край Евразийской литосферной плиты — упор, в который упираются и у которого расплющиваются, выжимаемые к северу структуры и комплексы пород Альпийского пояса” [Большой..., 2007]. Современную геодинамику земной коры можно конкретизировать как продолжение ее новейшей

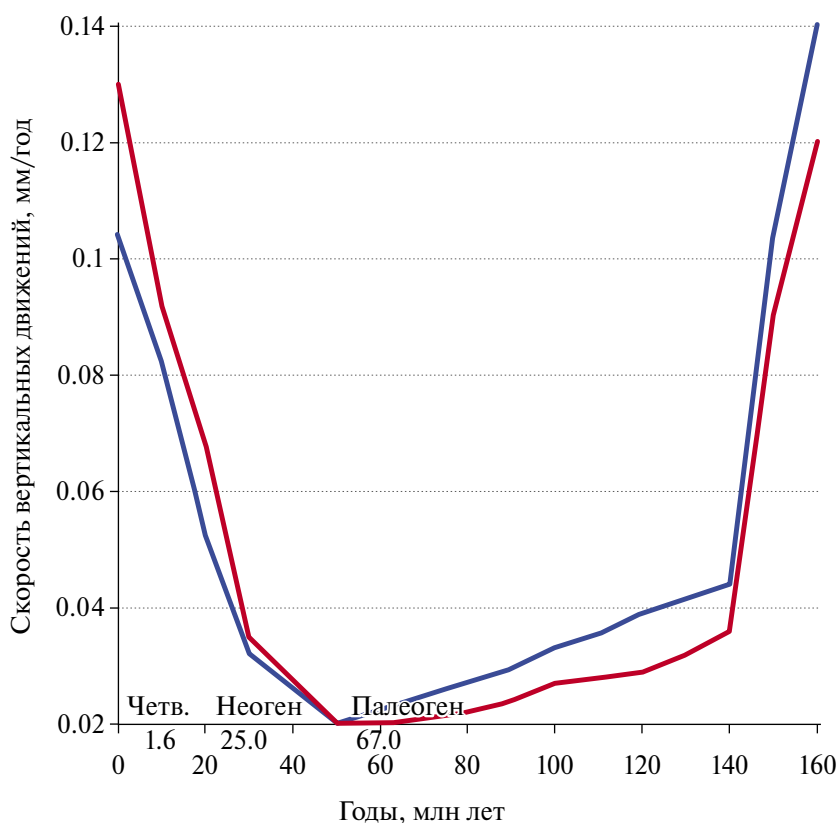


Рис. 13. Скорость вертикальных движений по геологическим данным в течение альпийского цикла по работе [Шолпо, 1978]. Синий цвет — южный склон Большого Кавказа, красный — северный склон Большого Кавказа.

тектонической эволюции. С учетом исследований [Philip, Gvishiani et al., 1989; Расцветаев, 2002; Шевченко и др., 2016; Лукк, 2019; и др.] ее можно представить следующим образом.

1. Безусловно, главным источником как новейших, так и современных движений является перемещение Аравийской литосферной плиты как результат альпийского горообразования планетарного характера. В настоящей статье не обсуждаются энергетические источники и причины этого процесса, но необходимо отметить, что убедительной окончательной гипотезы нет. Многие авторы отмечают также встречное, менее интенсивное, надвигание южного сектора Восточно-Европейской платформы [Большой..., 2007]. Как итог этого процесса — укорочение земной коры в меридиональном направлении и расширение в субширотном, в т.ч. подтвержденные результатами ГНСС-наблюдений.

2. Северный выступ Аравийской плиты упирается в консолидированный прочный слой океанической литосферы, меняет направление движения: под углом 90° на западное по Восточно-Анатолийскому разлому и северо-восточное — в Малый Кавказ. Непосредственно

с Большим Кавказом взаимодействует система сдвиговых разломов Малокавказской дуги (рис. 3) [Большой..., 2007]. В этой зоне произошло Спитакское землетрясение в Армении. Здесь очевидно подобие двух групп тектонических элементов: Малый Кавказ—межгорные впадины—Большой Кавказ и Памир—межгорные впадины—Южный Тянь-Шань [Большой..., 2007]. Линейность Большого Кавказа и Южного Тянь-Шаня на фоне дугообразных форм Малого Кавказа и Памира свидетельствует (см. работу [Большой..., 2007]) о жесткости консолидированных упоров пород Большого Кавказа и Южного Тянь-Шаня. Вместе с тем, под сомнение ставится утверждение некоторых авторов о существовании зоны субдукции между Малым и Большим Кавказом. Этому противоречат длительные отрицательные вертикальные движения впадин бассейнов рек Куры и Риони. Напор консолидированной коры Малого Кавказа на жесткую литосферу Большого Кавказа должен был приводить к обратному результату.

3. В вертикальном разрезе давление Аравийской плиты вызывает подвиг коры Закавказской плиты под окраину Скифской. По данным

геофизики между ними находится “прослой” менее плотных и более подверженных деформированию пород. Это является причиной подъема Большого Кавказа. При этом в направлении с юга на север абсолютные значения скоростей СДЗК по ГНСС-данным — уменьшаются. Наибольшая скорость отмечена для территории, лежащей к югу от Главного Кавказского разлома. Причем отмеченные разнонаправленные подвиги на западе и востоке создают в центральной части Большого Кавказа, растягивающие усилия. Вероятно, с этим связано образование вулканических структур Эльбруса и Казбека.

4. На рис. 14 показана схема для позднеальпийского времени, которая иллюстрирует предварительную модель современных движений Большого Кавказа с учетом данных работы [Расцветаев, Маринин, 2008] и результатов геодезических наблюдений. В центре находится блок осевой зоны Кавказского хребта, который при давлении Закавказской плиты, выдавливается вверх, что приводит к длительному подъему Большого Кавказа. В верхней части разреза

при подъеме происходит разгрузка, приводящая к увеличению площади земной поверхности. Приблизительно такую же модель предложили авторы работы [Philip, Gvishiani et al., 1989]. Эта схема объясняет кинематику современных вертикальных и горизонтальных СДЗК.

В качестве подтверждения подобного механизма развития содвига Ю.Г. Леоновым перечисляются: линейная форма сооружений, субвертикальные системы тектонической делимости, развитие деформаций сплющивания, тектонического течения в латеральном (по простирацию зоны) и вертикальном направлениях с образованием горного рельефа, широкое развитие продольных сдвигов [Большой..., 2007].

5. Этот глобальный процесс накладывается на блоковое строение территории и приводит к формированию деформаций иерархии уровней и иерархии масштабов [Мячкин и др., 1982]. Собственно, этим и определяется динамика перестройки напряженного состояния и, связанная с этим, сейсмическая опасность. Резкие различия в скоростях и в направленности

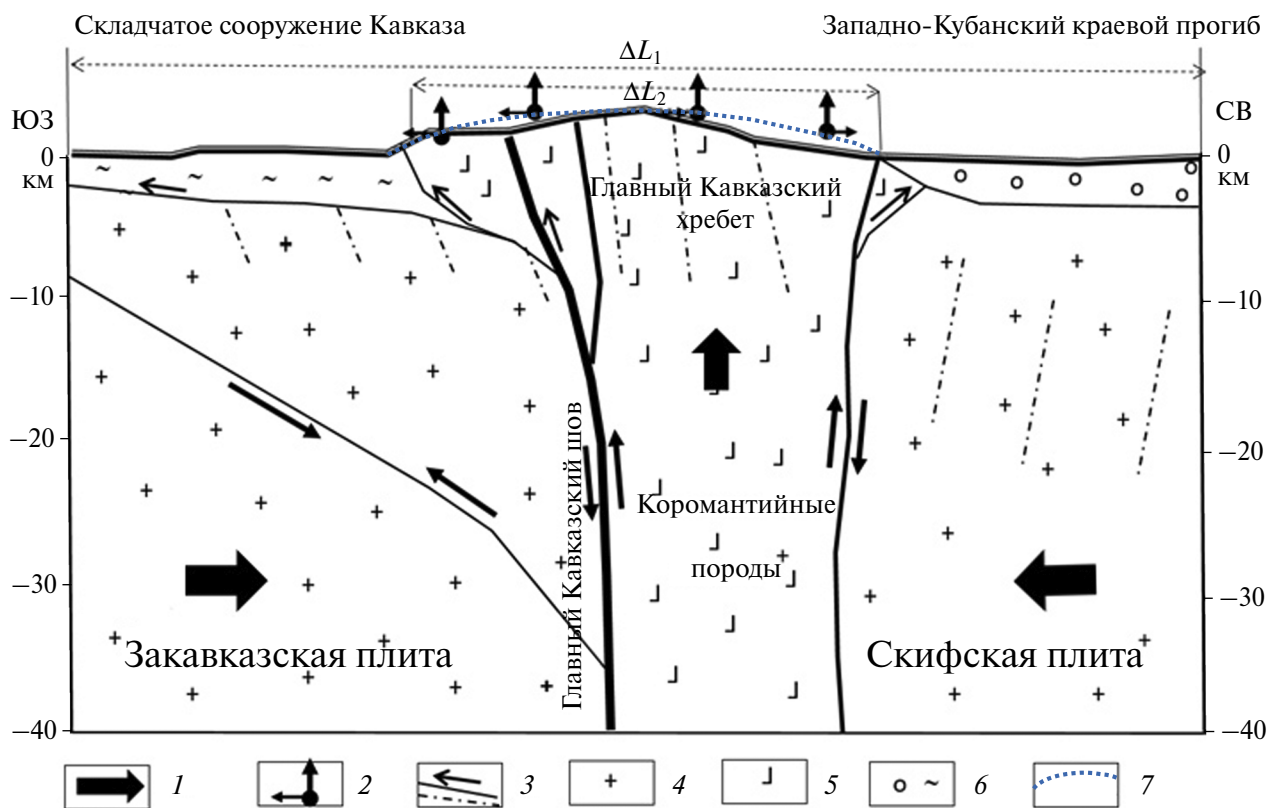


Рис. 14. Модель современных движений Большого Кавказа с учетом работы [Расцветаев, Маринин, 2008] и результатов геодезических наблюдений: 1 — направления движения литосферных плит и подъема Большого Кавказа; 2 — направления движений пунктов ГНСС на земной поверхности; 3 — разломы и движения по ним; 4 — верхний слой консолидированной коры; 5 — коромантийная смесь; 6 — осадочные и вулканогенно-осадочные породы; 7 — контур земной поверхности.

современных вертикальных и горизонтальных СДЗК, приводят к образованию высокоградиентных участков с критически высоким уровнем кулоновских напряжений на их границах. Результаты моделирования [Ребецкий, 2023] показывают, что кулоновские напряжения в блоковой среде, большие значения соотношения напряжений σ_1/σ_2 могут быть подвержены резким изменениям при высоких скоростях деформаций и приводить к сильным коровым землетрясениям [Морозов и др., 2018; Кафтан, Татарinov, 2022]. Поэтому при оценке сейсмической опасности следует обращать особое внимание на высокоградиентные зоны вертикальных и горизонтальных СДЗК.

6. Глубокие землетрясения на Кавказе локализованы на территории в широкой полосе северо–северо-западного простирания, т.е. поперек, а не вдоль кавказских структур, что требует в дальнейшем объяснения. Кроме этого, за счет того, что западная часть Большого Кавказа оказывается в боковой части давления Аравийской плиты, сейсмичность на западе значительно меньше, чем на востоке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокоточное нивелирование показало, что на протяжении 100 лет горные сооружения Кавказа испытывают подъем, а межгорные впадины – опускание. Периоды со скоростью подъема более 10 мм/год, чередуются с периодами малых скоростей. Это позволяет утверждать, что продолжается тенденция тектонической эволюции региона, свойственная ему, по крайней мере со среднего палеогена. Зоны современных поднятий пространственно согласуются с аномалиями региональных геофизических полей, геоморфологическими и структурными особенностями региона. Это указывает на глубинную тектоническую природу поднятий. Анализ публикаций показывает, что данное явление не является уникальным. Оно регистрируется в районах сейсмически активных границ глобальных тектонических плит, зонах континентальной коллизии и субдукции. Подъемы Большого и Малого Кавказа демонстрируют пространственную и временную связь с сильными землетрясениями, очаги которых находятся преимущественно в зонах высоких градиентов скоростей вертикальных движений. Землетрясения происходят после завершения периодов наиболее быстрых движений в течение первых десятилетий после них. Вероятно, в это время идет накопление упругой энергии.

Результаты точного нивелирования представляют важную информацию для физического понимания геодинамических механизмов и проверки современных тектонических концепций. Весьма полезным было бы проведение очередного цикла нивелирования на территории всего региона в рамках международного научного сотрудничества. Сгущение региональной сети непрерывных ГНСС-наблюдений, также должно способствовать решению этой важной научной задачи.

Модель деформирования Большого Кавказа на новейшем и современном этапах его тектонической эволюции позволяет также глубже понять геодинамические процессы, происходящие в зоне коллизии тектонических плит. Построение окончательной модели в настоящее время еще невозможно, но возможно формулирование кинематических условий современных движений, определяющих современное поле напряжений Кавказа.

Настоящее исследование планируется в ближайшее время развить и продолжить путем детального анализа и обобщения результатов наблюдений за горизонтальными движениями и деформациями земной коры Кавказа средствами ГНСС.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-17-00176 “Системная оценка сейсмической опасности центральной части Большого Кавказа (Осетинский сектор)”.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовались данные и сервисы, предоставленные ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736. DOI: 10.5800/GT-2017-8-4-0314
- Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Ю.Г. Леонов (ред.). М.: ГЕОС. 2007. 368 с.
- Галаганов О.Н., Гусева Т.В., Розенберг Н.К., Передерин В.П. Изучение движений земной коры геодезическими методами. Актуальность идей Г.А. Гамбурцева в геофизике XXI века. М.: Янус-К. 2013. С. 329–338.

- Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 536 с.
- Годзиховская А.А. Каталог землетрясений Кавказа с древнейших времен (-550 г.) по 2000 г. <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/caucasus>
- Гурбанов А.Г., Миллюков В.К., Газеев В.М., Лексин А.Б., Докучаев А.Я., Гурбанова О.А. Оценка векторов скорости современных горизонтальных и вертикальных смещений литосферных блоков на территории большого Кавказа и их геодинамическая интерпретация (по данным ГНСС) // Вестник Владикавказского научного центра. 2023. № 1. С. 49–61. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.26.001
- Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. ГКИНП (ГНТА)–03-010-. 03.2004. М.: ЦНИИГАиК. 2004. 226 с.
- Кадыров Ф.А., Мамедов С.Г., Сафаров Р.Т. Активная геодинамика Кавказа // Геофизический журнал. 2017. 39 (4). С. 98–101.
- Кадыров Ф.А., Сафаров Р.Т. Деформация земной коры Азербайджана и прилегающих территорий по данным GPS-измерений // Известия национальной академии наук Азербайджана. Науки о Земле. 2013. № 1. С. 47–55.
- Карта современных вертикальных движений Восточной Европы, м-б 1:10 000 000. М.: ГУГК СССР. 1971.
- Карта современных вертикальных движений Восточной Европы, м-б 1:2 500 000. М.: ГУГК СССР. 1973.
- Карта современных вертикальных движений земной коры на территории Болгарии, Венгрии, ГДР, Польши, Румынии, СССР (Европейская часть), Чехословакии. Масштаб 1:25 000 000. М.: ГУГК. 1986.
- Карта современных вертикальных движений на территорию СССР, м-б 1:5 000 000. М.: ГУГК СССР. 1989.
- Кафтан В.И. Карты современных движений земной коры: содержание и информативность // Физика Земли. 1996. Т. 32. № 1. С. 42–53.
- Кафтан В.И., Татаринцев В.Н. Регистрация медленных деформационных волн по данным ГНСС-наблюдений // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 505. № 1. С. 95–102. DOI: 10.31857/S268673972207009X
- Кафтан В.И., Кузнецов Ю.Г., Серебрякова Л.И., Верещетина А.В. Карта скоростей вертикальных движений земной поверхности Прикаспийского региона // Геодезия и картография. 1995. № 12. С. 18–21.
- Копп М.Л. Коллизионная структура Кавказского региона. Большой Кавказ в альпийскую эпоху. М.: ГЕОС. 2007. С. 285–314.
- Кочарян Г.Г. Разломная зона как нелинейная механическая система // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. Спец. выпуск. С. 5–17.
- Кузнецов Ю.Г., Кафтан В.И., Бебутова В.К., Серебрякова Л.И., Верещетина А.В. Современные вертикальные движения земной поверхности Прикаспийского региона // Геодезия и картография. 1997. № 9. С. 29–34.
- Кузьмин Ю.О. Геодинамическая эволюция Центральной Азии и современная геодинамика Копетдагского региона (Туркменистан) // Физика Земли. 2021. № 1. С. 144–153.
- Лилиенберг Д.А. Общие и региональные закономерности современной геодинамики Кавказа. Современные тектонические движения земной коры. Киев: Наук. думка. 1980. С. 204–217.
- Лилиенберг Д.А., Кафтан В.И., Кузнецов Ю.А., Серебрякова А.Г. Картографические модели вариаций современных тектонических движений морфоструктур Кавказа и Закавказья для различных эпох // Геоморфология. 1997. № 4. С. 63–75.
- Лукина Н.В. Некоторые черты неотектонической структуры Большого Кавказа. Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода № 52. 1983. С. 29–41.
- Лукк А.А., Шевченко В.И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа // Физика Земли. 2019. № 4. С. 99–123. DOI: 10.31857/S0002-33372019499-123
- Милановский Е.Е., Хаин В.Е. Основные черты тектонического развития альпийского Средиземноморско-Индонезийского пояса. Орогенетические пояса. М.: Наука. 1968. 247 с.
- Миллюков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS-наблюдениям // Геотектоника. 2015. № 3. С. 56–65. DOI: 10.7868/S0016853X15030042
- Миллюков В.К., Миронов А.П., Стеблов Г.М., Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А., Дробышев В.Н., Кусраев А.Г., Хубаев Х.М., Торчинов Х.З. Спутниковый геодезический мониторинг зоны Владикавказского активного разлома: первые результаты // Физика Земли. 2017. № 4. С. 110–117. DOI: 10.7868/S0002333717040068
- Морозов В.Н., Кафтан В.И., Татаринцев В.Н., Колесников И.Ю., Маневич А.И., Мельников А.Ю. Моделирование напряженно-деформированного состояния и результаты GPS-мониторинга эпицентральной зоны землетрясения 24 августа 2014, М 6 (Нара, США) // Геотектоника. 2018. № 5. С. 90–102. DOI: 10.1134/S0016853X18040069
- Мячкин В.И., Осокина Д.М., Цветкова Н.Ю. Тектонофизический анализ полей напряжений и проблемы физики очага землетрясений. Модели изменения напряженно-деформированного состояния массивов пород в приложениях к прогнозу землетрясений. Апатиты: Кольск. фил. АН СССР. 1982. С. 3–24.
- Общая характеристика и история рельефа Кавказа. М.: Наука. 1977. 288 с.
- Осокина Д.Н. Об иерархических свойствах тектонических напряжений. Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. 184 с.
- Прилепин М.Т., Баласанян С., Баранова С.М., Гусева Т.В., Мишин А.В., Надария М., Рогожин Е.А., Розенберг Н.К., Сквородкин Ю.П., Хамбургер М., Кинг Р., Рейлингер Р. Изучение кинематики Кавказского региона с использованием GPS технологии // Физика Земли. 1997. № 6. С. 68–75.
- Расцветаев Л.М. Некоторые особенности позднеальпийской структуры орогенетических областей юга СССР и тектонические напряжения новейшего времени. Новейшая тектоника, новейшие отложения и человек. М.: изд-во МГУ. 1973. С. 57–108.

- Расцветаев Л.М.* О некоторых актуальных проблемах структурной геологии и тектонофизики. Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН. 2002. С. 333–373.
- Расцветаев Л.М., Маринин А.В.* Соотношение поверхностной и глубинной структуры Северо-Западного Кавказа. Материалы четырнадцатой международной конференции. Петрозаводск: КНС РАН. 2008. С. 139–142.
- Ребецкий Ю.Л.* Современное напряженное состояние коры Кавказа по данным объединенного каталога механизмов очагов землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 1. С. 17–29. DOI: 10.5800/GT-2020-11-1-0459
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонофизическое районирование сейсмогенных разломов Восточной Анатолии и Караман-марашские землетрясения 06.02.2023 г. // Физика Земли. 2023. № 6. С. 37–65. DOI: 10.31857/S0002333723060170
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатилов А.В.* Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН. 2014. 256 с.
- Сафаров Р.Т., Вахабов У.Г.* Геодинамика, активные разломы и механизмы очагов землетрясений в зоне псевдосубдукционного взаимодействия континентальных микроплит Южного и Северного Кавказа (южный склон Большого Кавказа, Азербайджан) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1099–1126. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0385
- Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О.* Современные движения земной коры осадочных бассейнов. М.: Наука. 1989. 189 с.
- Сим Л.А., Гордеев Н.А.* Сравнение результатов изучения тектонических напряжений Кавказа разными методами. Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы. 2022. Материалы LIII Тектонического совещания. Т. 2 / К.Е. Дегтярев (отв. ред.). М.: ГЕОС. 2022. С. 175–178.
- Татаринев В.Н.* Геодинамическая безопасность на объектах ядерного топливного цикла // Использование и охрана природных ресурсов в России. Бюллетень № 1 (85). 2006. С. 46–51.
- Трифонов В.Г.* Неотектоника подвижных поясов. Неотектоника подвижных поясов / К.Е. Дегтярев (ред.). М.: ГЕОС. 2017. 180 с.
- Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А.* Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. М.: ГЕОС. 2002. 225 с.
- Физические процессы в очагах землетрясений / М.А. Садовский, В.И. Мячкин (ред.). М.: Наука. 1980. 287 с.*
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. М.: Университет. Книжный дом. 2010. 560 с.
- Шевченко В.И., Гусева Т.В., Лукк А.А., Мишин А.В., Прилепин М.Т., Рейлинджер Р.Э., Хамбургер М.У., Шемпелев А.Г., Юнга С.Л.* Современная геодинамика Кавказа (по результатам GPS-измерений и сейсмологическим данным) // Физика Земли. 1999. № 9. С. 3–18.
- Шевченко В.И., Гусева Т.В., Лукк А.А., Прилепин М.Т., Стеблов Г.М., Милоков В.К., Миронов А.П., Курсаев А.Г., Дробышев В.Н., Хубаев Х.М.* Неплейттектоническая GPS-геодинамика Большого Кавказа. Материалы XLVIII Тектонического совещания. Т. 2. М.: Геос. 2016. С. 295–299.
- Шолто В.Н.* Альпийская геодинамика Большого Кавказа. М.: Недра. 1978. 178 с.
- Adamia Sh., Zakariadze G., Chkhotua T., Sadradze N., Tsereteli N., Chabukiani A., Gventsadze A.* Geology of the Caucasus: A Review // Turkish Journal of Earth Sciences. 2011. V. 20. P. 489–544. DOI: 10.3906/yer-1005-11
- Ahadov B., Jin S.* Present-day kinematics in the Eastern Mediterranean and Caucasus from dense GPS observations // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2017. V. 268. P. 54–64. DOI: 10.1016/J.PEPI.2017.05.003
- Castle R.O., Simpson R.W.* An early-20th-century uplift in Southern California: associations with seismicity. Proc. of China-United States Symposium on Crustal Deformation and Earthquakes. Beijing: Seismological Press. 1988. P. 44–51.
- Dragert H., Lisowski M.* Crustal Deformation Measurements on Vancouver Island, British Columbia: 1976 to 1988 / Vyskocil P., Reigber C., Cross P.A. (eds.). Global and Regional Geodynamics. International Association of Geodesy Symposia. NY: Springer. 1990. V. 101. DOI: 10.1007/978-1-4615-7109-4_28
- El-Fiky G., Kato T., Fujii Y.* Distribution of vertical crustal movement rates in the Tohoku district, Japan, predicted by least-squares collocation // Journal of Geodesy. 1997. V. 71. P. 432–442. DOI: 10.1007/s001900050111
- Fujii Y., Xia Sh.* Estimation of distribution of the rates of vertical crustal movements in the Tokai District with the aid of least squares prediction // Journal of Physics of the Earth. 1993. V. 41. P. 239–256. DOI: 10.4294/jpe1952.41.239
- Ibarra D.E., Dai J., Gao, Y. et al.* High-elevation Tibetan Plateau before India–Eurasia collision recorded by triple oxygen isotopes // Nature Geoscience. 2023. V. 16. P. 810–815. DOI: 10.1038/s41561-023-01243-x
- Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., Gorshkov A., Gvishiani A., Ismail-Zadeh T., Kaban M.K., Kadirov F., Karapetyan J., Kangarli T., Kiria J., Koulakov I., Mosar J., Mumladze T., Müller B., Sadradze N., Safarov R., Schilling F., Soloviev A.* Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus // Earth-Science Reviews. 2020. V. 207. P. 103222. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103222
- Kaban M., Gvishiani A., Sidorov R., Oshchenko A., Krasno-perov R.* Structure and Density of Sedimentary Basins in the Southern Part of the East-European Platform and Surrounding Area // Applied Sciences. 2021. V. 11. № 2. DOI: 10.3390/app11020512
- Kaftan V.* Anomalous land uplifts and seismicity in Caucasus. XXI General Assembly of the EGS. Annales Geophysicae. 1996. Suppl. I to V. 11. P. 251.
- Karapetyan J., Sargsyan R., Kazaryan K., Dzeranov B., Dzeboev B., Karapetyan R.* Current state of exploration and actual problems of tectonics, seismology and seismotectonics of Armenia // Russian Journal of Earth Sciences. 2020. V. 20. № 2. DOI: 10.2205/2020ES000709

- Loskutov A.A., Shoulmin M.V., Kaftan V.I. Physical correlation of repeated geodetic measurements // *Journal of Geodynamics*. 1988. V. 10. P. 139–146.
- McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gürkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., Kastens K., Kekelidze G., King R., Kotzev V., Lenk O., Mahmoud S., Mishin A., Nadariya M., Ouzounis A., Paradissis D., Peter Y., Prilepin M., Reilinger R., Sanlı I., Seeger H., Tealeb A., Toksöz M.N., Veis G. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus // *Journal of Geophysical Research*. 2000. V. 105. № B3. P. 5695–5719. DOI: 10.1029/1999JB900351
- Mescherikov J.A. Recent crustal movements in seismic regions: Geodetic and geomorphic data // *Tectonophysics*. 1968. V. 6. № 1. P. 29–39.
- Meschersky I.N., Korokina T.P. Some evidence of recent vertical movements of the Earth's surface in the USSR. Pap. of the XVI-th Gen. Ass. IAG IUGG. Grenoble. Aug. 1975. Moscow. 11 p.
- Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision // *Tectonophysics*. 1989. V. 161. № 1–2. P. 1–21. DOI: 10.1016/0040-1951(89)90297-7
- Plafker G., Ward S.N. Backarc thrust faulting and tectonic uplift along the Caribbean Sea Coast during the April 22, 1991 Costa Rica earthquake // *Tectonics*. 1992. V. 11. № 4. P. 709–718. <https://doi.org/10.1029/92TC00609>
- Plafker G. Alaskan earthquake of 1964 and Chilean earthquake of 1960: Implications for arc tectonics // *Journal of Geophysical Research*. 1972. V. 77. № 5. P. 901–925. DOI: 10.1029/JB077i005p00901
- Reilinger R., McClusky S., Souter B., Hamburger M., Prilepin M., Mishin A., Guseva T., Balassanian S. Preliminary estimates of plate convergence in the Caucasus collision zone from global positioning system measurements // *Geophysical Research Letters*. 1997. V. 24. № 14. P. 1815–1818. DOI: 10.1029/97GL01672
- Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sakr K., Ar-Rajehi A., Paradissis D., Al-Aydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitrova A., Filikov S.V., Gomez F., Al-Ghazzi R., Karam G. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2006. V. 111. № B5. DOI: 10.1029/2005JB004051
- Seno T. Intermediate-term precursors of great subduction zone earthquakes: An application for predicting the Tokai earthquake // *Earth Planets Space*. 2004. V. 56. P. 621–633.
- Tan O., Taymaz T. Active tectonics of the Caucasus: Earthquake source mechanisms and rupture histories obtained from inversion of teleseismic body waveforms / Dilek Y., Pavlides S. (eds.). *Postcollisional tectonics and magmatism in the Mediterranean region and Asia* // *Geological Society of America*. 2006. V. 409. P. 531–578. DOI: 10.1130/2006.2409(25)
- Tibaldi A., Tsereteli N., Varazanashvili O., Babayev G., Barth A., Mumladze T., Bonali F.L., Russo E., Kadirov F., Yetirmishli G., Kazimova S. Active stress field and fault kinematics of the Greater Caucasus // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. V. 188. P. 104108. DOI: 10.1016/j.jseae.2019.104108
- Trabant C., Hutko A.R., Bahavar M., Karstens R., Ahern T., Aster R. Data Products at the IRIS DMC: Stepping Stones for Research and Other Applications // *Seismological Research Letters*. 2012. V. 83. № 5. P. 846–854. DOI: 10.1785/0220120032
- Wu Y., Han J., Yu P. Features of crustal deformation field of long- and medium-term seismic risk area // *Journal of Earthquake Prediction Research*. 1996. V. 5. P. 277–285.
- Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // *Earth System Science Data*. 2022. V. 14. № 10. P. 4489–4503. DOI: 10.5194/essd-14-4489-2022

Neotectonic Evolution of the Caucasus: Recent Vertical Movements and Mechanism of Crustal Deformation

V. N. Tatarinov^{a,b,*}, V. I. Kaftan^a, A. I. Manevich^{a,c}, B. A. Dzeboev^{a,d}, B. V. Dzeranov^{a,d},
A. M. Avdonina^a, I. V. Losev^{a,c}, and A. A. Korol'kova^a

^a*Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Science, Moscow, 123242 Russia*

^c*National University of Science and Technology "MISIS," Moscow, 119049 Russia*

^d*Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, 362002 Russia*

*e-mail: v.tatarinov@gcras.ru

Received February 14, 2024

revised March 18, 2024

accepted March 22, 2024

Abstract — It is generally recognized that the formation of the fold-and-thrust tectonic structures of mobile belts on continents is associated with crushing and narrowing of the Earth's crust as a result of collision of lithospheric plates. The deformation of the Caucasian lithosphere in the neotectonic time is generally consistent with these ideas. However, the block differentiation of the Caucasian lithosphere introduces specific features in the directivity of modern vertical and horizontal movements. In this paper, we analyze vertical movements of the Caucasus estimated by means of high-precision leveling over more than a century and consider their spatial correlation with tectonics, seismicity, stress-strain state, and geophysical fields. A clear relationship indicating the deep tectonic nature of the long-term uplifting of the Caucasus crust is revealed.

Due to the differentiation of the Arabian plate movement, the territory of the Caucasus is divided into provinces that differ from each other in the pattern of modern movements, in the orientation of faults, and in the stress-strain state. The seismic regime in these provinces also has differences in the number of seismic events and focal mechanisms of the earthquakes. We propose a model of the deformation mechanism of the Greater Caucasus, which takes into account the long-term trend of the Caucasus uplifting in the conditions of general shortening of the Earth's crust. The results of the analysis are used as a basis for discussion of a probable mechanism of tectonic evolution of the Greater Caucasus in the neotectonic time, which can be used in the assessment of seismic hazard in the North Caucasus.

Keywords: Caucasus, vertical movements, Earth's crust, tectonic evolution, geometric leveling, uplifting, deformations, seismic hazard