

# Анализ напряженно-деформированного состояния Кавказского региона (Азербайджан) по векторам максимальных горизонтальных напряжений с использованием программ проекта “World Stress Map”

© Г. Р. Бабаев<sup>1</sup>, Э. В. Ахмедова<sup>2</sup>, Ф. А. Кадиоров<sup>1</sup>, 2017

<sup>1</sup>Институт геологии и геофизики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

<sup>2</sup>Бакинский государственный университет, Министерство образования Азербайджана, Баку, Азербайджан

Поступила 9 февраля 2017 г.

Досліджено побудову моделей на основі аналізу впливу топографічних аномалій рельєфу на формування напружено-деформованого стану літосфери Кавказького регіону (Азербайджан) за допомогою методу скінченних елементів із застосуванням програмних комплексів *Hypermesh*<sup>TM</sup> і *Abaqus*<sup>TM</sup>. За побудованими моделями визначено напрямки і локалізацію горизонтальних осей напружень на різних літосферних глибинах. Отримані дані зіставлено з картою напружень, розрахованих для механізму вогнищ землетрусів Азербайджану з використанням програми CASMO (“Світова карта напружень”) за період 1990—2015 рр. У цілому вогнища землетрусів збігаються із зонами напруженого стану, які формуються під впливом топографічних аномалій Кавказького регіону. Встановлено, що в основному західна і центральна частини Великого Кавказького хребта зазнають північно-східного—південно-західного розтягання. У східній частині це розтягання змінюється інтенсивним стисненням. У досліджуваному регіоні переважають землетруси з підкидним типом механізму вогнища поряд з проявами нормального скиду і зсуву зі зміщенням за простяганням. Урахування топографічних аномалій під час аналізу напружено-деформованого стану на різних рівнях глибин літосфери дасть змогу отримувати достовірніші дані для складання геодинамічної моделі регіону. Подібні дослідження необхідно проводити в разі будівництва стратегічних об’єктів, особливо підземних конструкцій (шахт, тунелів, підземних трубопроводів, терміналів), оскільки при цьому важливо враховувати якомога більше факторів, що впливають на формування напружено-деформованого стану земної кори.

**Ключові слова:** топографічні аномалії, Великий і Малий Кавказ, механізми формування вогнищ землетрусів, напружено-деформований стан, вектори максимальних горизонтальних напружень, World Stress Map.

**Введение.** Территория Азербайджана расположена на востоке Кавказского сегмента Альпийской геосинклинальной области. Основными геоморфологическими элементами являются горы Большого и Малого Кавказа, Талышские горы, Куринская впадина [Alizadeh et al., 2016] (рис. 1). Кавказский регион является зоной активного взаимодействия Аравийской и Евразийской плит и оказывает значительное влияние на динамику региона [McKenzie, 1972; Sengor et al., 1985; Philip et al., 1989; Reilinger et al., 2006]. По данным GPS-геодезии скорости сдвиговых сме-

щений вдоль некоторых крупных разломов Большого Кавказа составляют около 8 мм/год [Reilinger et al., 2006; Кадиоров и др., 2013], скорость сокращения размеров земной коры в западной части территории Азербайджана (Малый и Большой Кавказ) оценена в  $4 \pm 1$  мм/год [Kadirov et al., 2008, 2015].

Топография исследуемого региона очень сложная и разнообразная. Средняя высота рельефа Азербайджана составляет 400 м. Юго-восточная часть Большого Кавказа характеризуется двумя горными хребтами высотой око-

до 4466 м [Alizadeh et al., 2016]. К юго-западу высота хребтов постепенно уменьшается до 1000—700 м. Малый Кавказ охватывает юго-западную и западную части Азербайджана с небольшой возвышенностью со сложной структурой [Alizadeh et al., 2016]. Талышские горы расположены в юго-восточной части Азербайджана, их максимальная высота составляет 2477 м. В Куринской впадине преобладают равнины и возвышенности, переходящие в низкогорье. Такие резкие изменения в топографии (перепады высот, отклонения в областях поднятий и прогибов) могут существенно влиять на формирование напряженного состояния в регионе. Влияние топографических особенностей на формирование напряженного состояния рассмотрено в работах [Ruppel, McNutt, 1990; Zoback, Mooney, 2003; Ребецкий, 2007; Протосеня, Беляков, 2011; Ребецкий и др., 2013]. Воздействие топографических особенностей (возвышенностей, горных массивов, межгорных впадин, крупных котловин) на поля напряжений было исследовано с применением методики трехмерного моделирования конечных элементов для территорий Украины, Италии, России, Японии, Норвегии, США,

Франции, Германии [Hashimoto, 1982; Ruppel, McNutt, 1990; Zoback, Mooney, 2003; Bada et al., 2005; Ismail-Zadeh et al., 2005; Yamasak, Seno, 2005; Беляков, 2010; Протосеня, Беляков, 2011; Ребецкий и др., 2013; Kreemer et al., 2014; Randolph et al., 2015].

Цель исследования — изучение влияния топографических аномалий на формирование напряженно-деформированного состояния на различных глубинах и анализ распределения напряжений в Кавказском регионе по данным исследований механизмов очагов землетрясений по методике CASMO за период 1990—2015 гг. Подобные исследования необходимо проводить при строительстве стратегических объектов, в особенности подземных конструкций (шахт, тоннелей, подземных трубопроводов, терминалов), так как при этом важно учитывать как можно больше факторов, влияющих на формирование напряженно-деформированного состояния земной коры.

**Современные движения.** За последние десятилетия получено большое количество новых данных геодезическими и GPS методами, которые позволили существенно расширить представление о характере современных движений

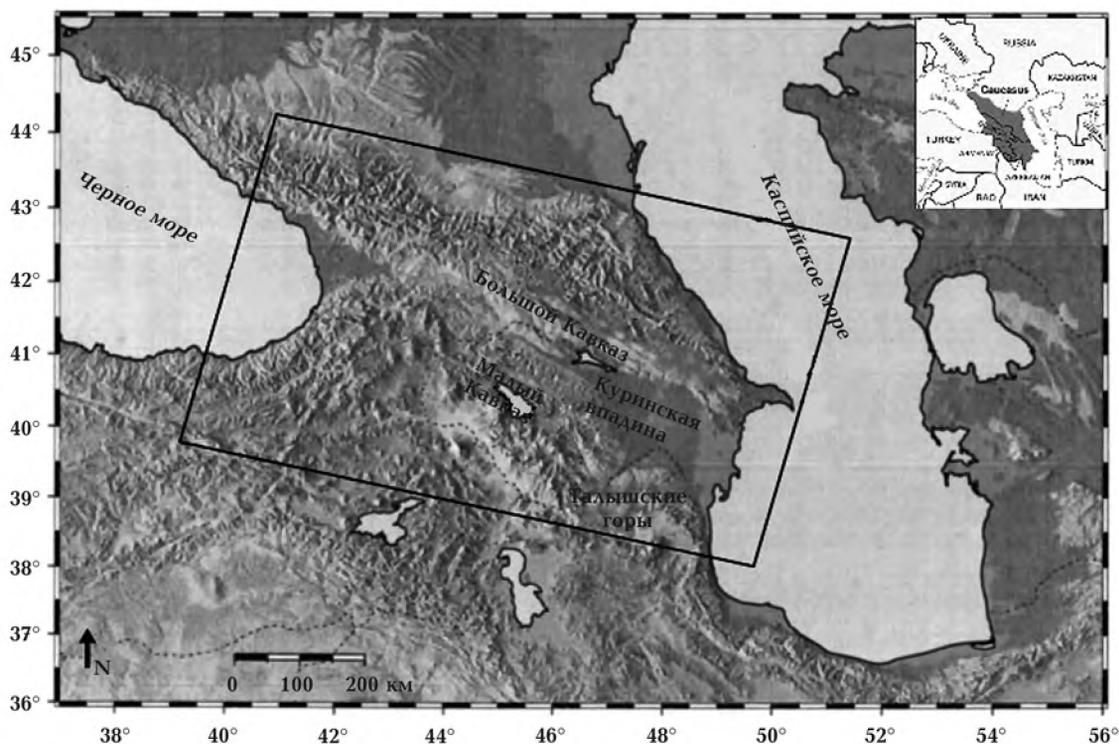


Рис. 1. Топография Кавказского региона (Азербайджан).

земной коры территории Кавказа. Результаты GPS мониторинга свидетельствуют об активной конвергенции между Малым Кавказом /Куринской впадиной и Большим Кавказом [Reilinger et al., 2006; Kadirov et al., 2008, 2012]. Скорости движения земной коры Кавказского региона и сопредельных территорий с 95 %-ными доверительными эллипсами уровня среднеквадратичной ошибки по данным наблюдений пунктов GPS представлены на рис. 2. Данные о скоростях движения взяты из работ [Nilforoushan et al., 2003; Reilinger et al., 2006; Kadirov et al., 2012, 2015; Alizadeh et al., 2016].

Полученные по результатам высокоточных нивелировок данные о современных вертикальных движениях земной коры указывают на интенсивные скоростные процессы [Лиленберг, 1980; Лиленберг и др., 1980; Яценко, 1989; Philip et al., 1989; Ахмедбейли и др., 1991; Nemčok et al., 2011]. На рис. 3 приведена карта скорости вертикальных движений земной коры в пределах Азербайджана.

Скорости поднятия земной коры на Большом и Малом Кавказе составляют 8 мм/год и более с максимальным значением 10 мм/год [Ка-

дилов, 2004; Kadirov et al., 2009]. В районе Тальшских гор установлены скорости современных вертикальных движений, достигающие 6 мм/год [Kadirov et al., 2008].

**Сейсмичность региона.** Процессы столкновения двух плит (Аравийской и Евразийской плит) и создавшиеся при этом деформации литосферы провоцируют землетрясения, сотрясая Кавказский регион в течение всего периода своего существования [Reilinger et al., 2006; Kadirov et al., 2008, 2015].

Ежегодно регистрируемые многочисленные (800—1000) слабые, средней силы и сильные землетрясения распределены крайне неравномерно по территории республики. На рис. 4 приводится карта сейсмических событий за период 1963—2016 гг. для территории Азербайджана и сопредельных территорий по данным каталога Республиканского центра сейсмологической службы НАН Азербайджана. Для сопредельных территорий были использованы региональные каталоги геофизических служб Российской академии наук, Ирана, Грузии, Европейского средиземноморского сейсмологического центра (EMSC).

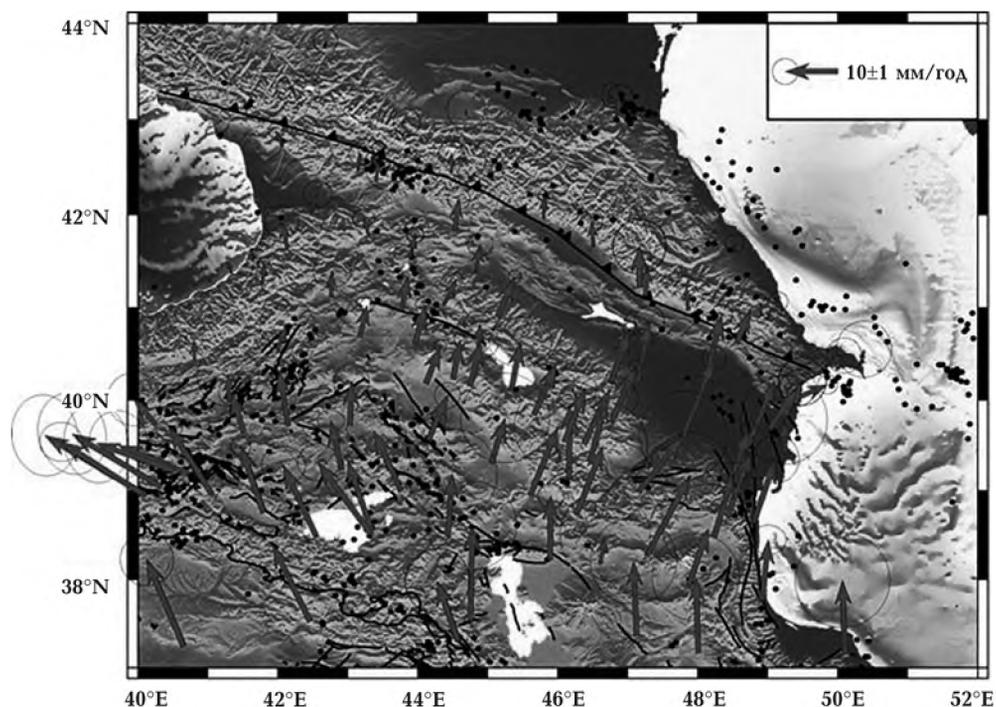


Рис. 2. Скорости движения земной коры Кавказского региона и сопредельных территорий с 95 %-ными доверительными эллипсами уровня среднеквадратичной ошибки по данным GPS пунктов.

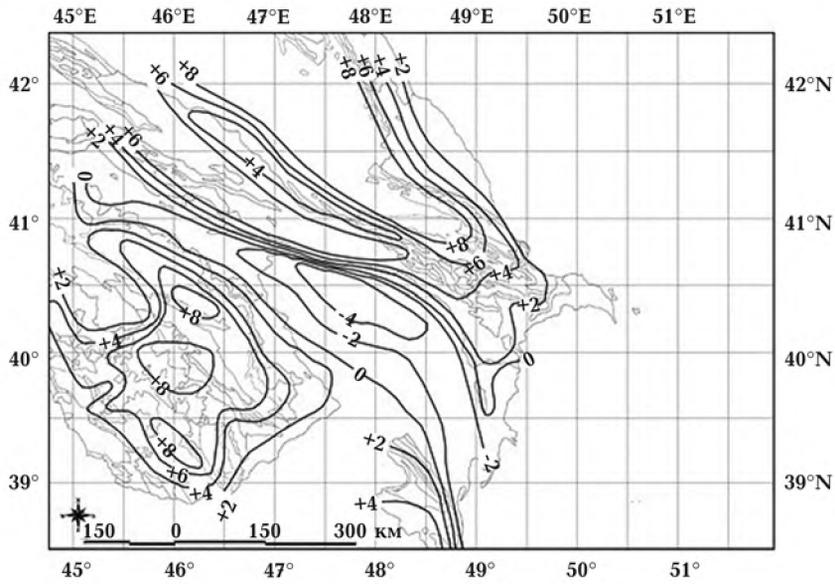


Рис. 3. Карта вертикальных движений земной коры Азербайджана. Значения даны в мм/год.

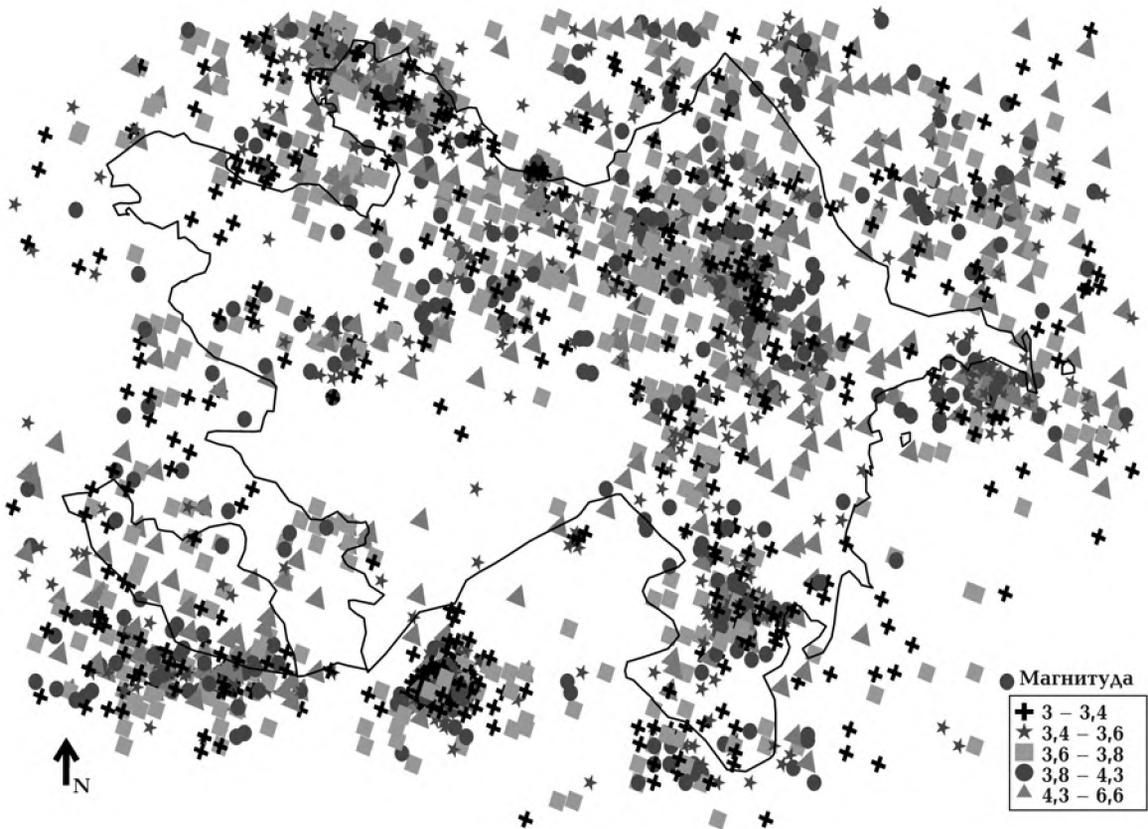


Рис. 4. Карта сейсмических событий на территории Азербайджана за период 1963—2016 гг.

Большинство этих землетрясений происходит на южном склоне восточной части Большого Кавказа и в Каспийском море. Значительная часть землетрясений с  $M > 3,0$  образует цепочки эпицентров вдоль горных хребтов [Kadirov et al., 2009, 2012, 2015; Babayev, 2009; Кадилов и др., 2013; Telesca et al., 2013; Yetirmishli et al., 2013], хотя отдельные землетрясения происходят и в коре межгорных впадин (см. рис. 4).

**Методика исследования.** Расчет влияния топографических аномалий на формирование напряженно-деформированного состояния выполнялся по методике, описанной в работах [Fleitout, Froidevaux, 1982; Molnar, Lyon-Caen, 1988; Lanbo, Zoback, 1992; Bada et al., 2001; Zoback, Mooney, 2003]. Согласно этим исследованиям причиной возникновения гравитационного напряжения являются топографические особенности рельефа, вариации плотностей горных массивов и мощностей земной коры.

Моделирование поля напряжений под воздействием топографических особенностей базировалось на алгоритме расчета трехмерного поля напряжений литосферы Земли, предполагающим численное решение уравнения равновесия упругопластической среды методом конечных элементов [Коптев, Ершов, 2011]. Этот подход был успешно применен к построению глобальных моделей распределения напряжений [Hashimoto, 1982; Molnar, Lyon-Caen, 1988; Ruppel, McNutt, 1990; Bada et al., 2001, 2005; Zoback, Mooney, 2003; Ismail-Zadeh et al., 2005; Yamasaki, Seno, 2005; Ребецкий, 2007; Беляков, 2010; Протоценя, Беляков, 2011; Коптев, Ершов, 2011; Ребецкий и др., 2013; Randolph et al., 2015].

В качестве исходных данных были исполь-

зованы: топография (цифровая модель рельефа ETOPO5 [National ..., 1988]) и карты поверхностей кристаллического фундамента и Мохоровичича [Шенгелая, 1984]. Деформационно-прочностные характеристики и параметры граничных условий глубинных массивов, используемые при разработке конечно-элементных моделей, представлены в таблице.

На различных этапах исследования для оцифровки карт использовалась программа Digger, а трехмерное моделирование было выполнено с помощью программы GoCAD. Для определения напряженно-деформированного состояния в значениях тензора напряжений применялось численное моделирование методом конечных элементов с использованием программных комплексов Hypermesh<sup>TM</sup> и Abaqus<sup>TM</sup>. Расчетная область модели выбрана следующим образом: нижние граничные условия зафиксированы на глубине 300 км, максимальная глубина верхней части коры составляет 25 км, глубина нижней границы коры 55 км. Размеры модели составляют 1092 км в направлении восток—запад и 849 км в направлении юг—север.

Введение в эти расчеты поправки на рельеф с учетом кривизны (сферичности) Земли позволяет получить модель, описывающую реальные вариации рельефа.

Для сравнения результатов моделирования с наблюдаемыми напряжениями были исследованы механизмы очагов землетрясений за период 1990—2015 гг. с  $M_w \geq 5$  по сейсмологическим данным [Agayeva, 2006; Agayeva, Babayev, 2009; Babayev, 2009; Кадилов и др., 2013; Kadirov et al., 2015] с использованием методики построения карты фокальных механизмов CASMO (“Ми-

### Деформационно-прочностные характеристики и параметры граничных условий глубинных массивов

Слои	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, Па	Коэффициент Пуассона	Мощность, км
Верхняя часть коры	2500	$5 \cdot 10^{10}$	0,42	25
Нижняя часть коры	2950	$8 \cdot 10^{10}$	0,42	55
Мантия	3500	$1,5 \cdot 10^{11}$	0,42	300
Слой ниже мантии	4100	$4 \cdot 10^{11}$	0,25	400

ровая карта напряжений”) [Heidbach et al., 2008]. В настоящее время мировая карта напряжений, составленная по проекту “World stress map”, содержит информацию об ориентациях осей главных напряжений Р и Т в очагах землетрясений [Zobak, 1992].

**Обсуждение результатов.** Решение поставленной задачи было выполнено в трехмерном режиме в программе GoCad, моделируя поверхность кристаллического фундамента, Мохо и топографических аномалий исследуемого региона, и продолжилось в рамках конечно-элементной сетки разработанной модели в программном комплексе Hypermesh<sup>TM</sup>. Численные расчеты векторов максимальных горизонтальных напряжений  $\sigma_{\max}$  по модели выполнялись в программном обеспечении Abaqus<sup>TM</sup>. На рис. 5 представлено распределение векторов максимальных горизонтальных напряжений  $\sigma_{\max}$  на глубине 100 и 200 км.

Из полученных результатов распределения векторов горизонтальных составляющих напряжений Кавказского региона видно (рис. 5, б) правостороннее сжимающее воздействие в области южной части Каспийского моря практически субмеридионального направления [Коптев, Ершов, 2011], что согласуется с данными GPS [Reilenger et al., 2006; Kadirov et al., 2008, 2012; Кадиров и др., 2013; Alizadeh et al., 2016]. По всей вероятности, такое сжимающее воздействие в этой области оказывает движение Аравийской плиты относительно Евразийской [Reilenger et al., 2006; Kadirov et al., 2008, 2012; Коптев, Ершов, 2011; Кадиров и др., 2013]. Из данных, относящихся к территории Азербайджана, в целом видно, что ориентация напряжений происходит в северо-северо-восточном направлении, что также соответствует данным GPS-геодезии [Kadirov et al., 2012; Кадиров и др., 2013]. На всей территории доминируют разломы взбросовых и взбросо-сдвиговых режимов.

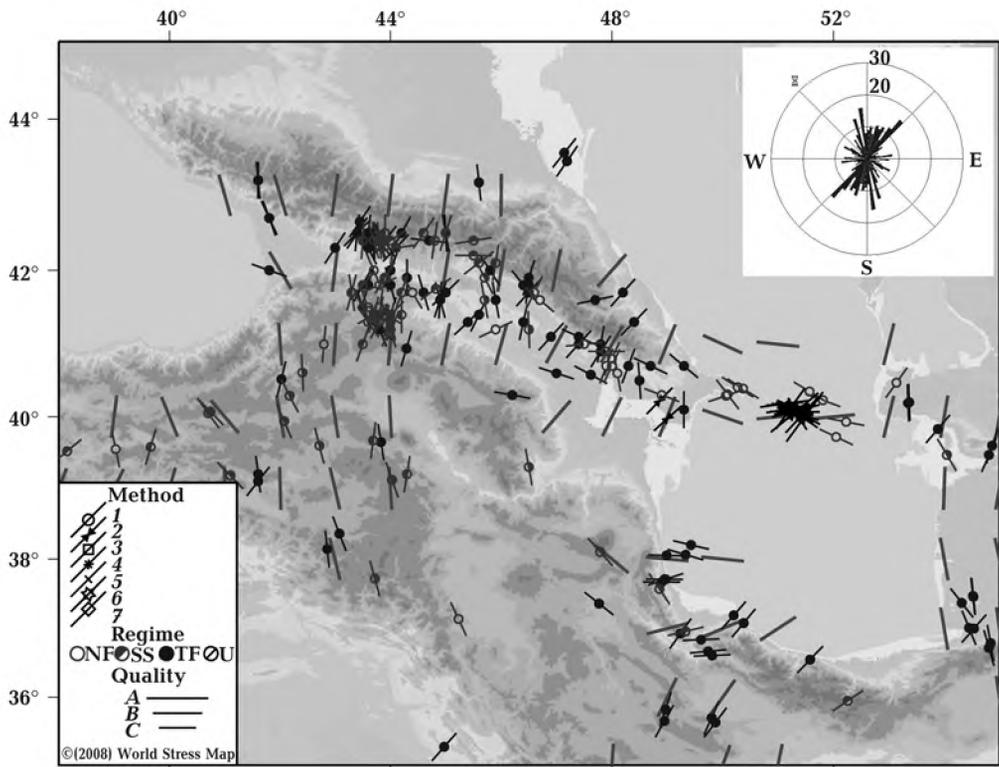
Анализируя характер развития полей напряжений (рис. 6), можно сделать вывод, что их формирование происходит в условиях влияния рельефа земной поверхности (топографических аномалий). Отчетливо прослеживается влияние рельефа земной поверхности на распределение напряжений на глубине 100 км, где наблюдается уменьшение напряжений растяжения и сжатия, вызванное воздействием локальных топо-

графических сил. Далее, по мере углубления, наблюдается реальная картина возрастания сжимающих и растягивающих напряжений.

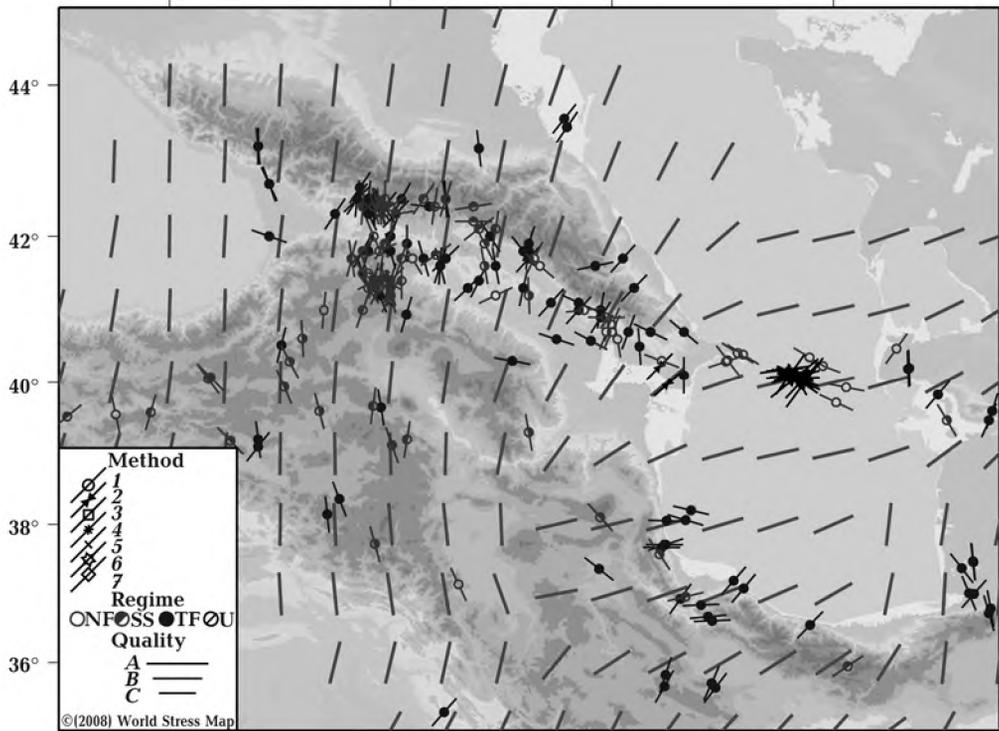
Для количественной оценки степени соответствия между фактическими и расчетными характеристиками напряженного состояния литосферы Кавказского региона под действием топографических аномалий было проведено сравнение результатов ориентации модельных полей напряжений с результатами статистической обработки данных “Мировой карты напряжений”. Полученные результаты распределения напряжений в целом схожи.

Фактически западная и центральная части Большого Кавказа находятся в состоянии северо-восточного—юго-западного растяжения. В восточной части это растяжение сменяется интенсивным сжатием. Из карты расчетного напряжения по фактическим данным землетрясений видно, что в исследуемом регионе расположен надвиговой (взбросовый) разлом горизонтального сжатия северо-северо-восточного направления, расположенный в западной части южного Кавказа, и восточно-северо-восточного направления, расположенный в восточной части Большого Кавказа. В западной части Азербайджана наблюдается сжатие. Кроме того, прослеживается очевидный переход от левостороннего сдвига по простиранию к преимущественно правостороннему сдвигу к югу от горного хребта Большого Кавказа, что хорошо согласуется с данными [Кадиров и др., 2013]. Происходит чередование видов ориентации главных напряжений и дифференциация типов подвижек по разломам (см. рис. 6).

**Выводы.** Согласно результатам моделирования и сравнения с фактическими данными напряжений, землетрясения в большинстве случаев происходят в результате надвиговых (взбросовых) типов разлома с некоторыми проявлениями нормального сброса и сдвигов со смещением по простиранию. Напряженно-деформированное состояние в исследуемом регионе различно: западная и центральная части Большого Кавказа находятся в состоянии северо-восточного—юго-западного растяжения, тогда как в восточной части это растяжение сменяется интенсивным сжатием. Южная часть Каспийского моря находится в состоянии сжатия северо-восточной ориентации. В целом, очаги зем-



a



б

Рис. 5. Распределение векторов максимальных горизонтальных напряжений  $\sigma_{\max}$  на глубине 100 км (а) и 200 км (б), сравнимых с картой механизмов очага, построенной с помощью CASMO (“Мировая карта напряжений”).

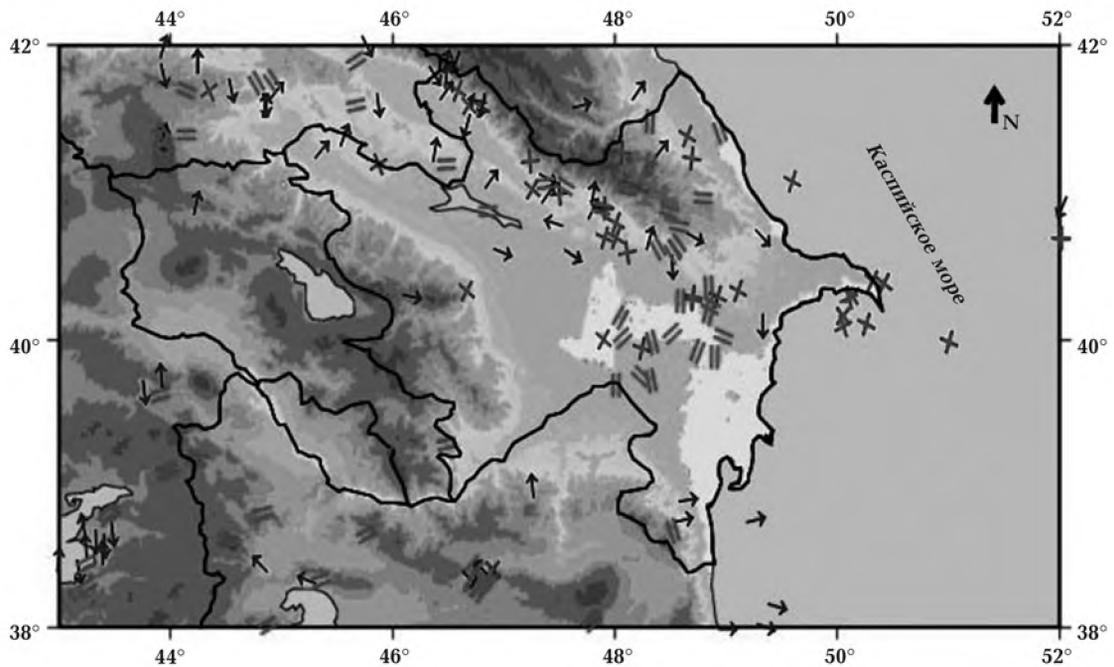


Рис. 6. Расчетное распределение напряжений территории Азербайджана и прилегающих областей по данным главных осей решений механизмов очагов землетрясений за период 1990—2015 гг. с моментной магнитудой  $M_w \geq 5$ . Карта построена по методике CASMO проекта “Мировая карта напряжений” [Heidbach et al., 2004, 2008] (составитель Г. Р. Бабаев). Стрелками показаны главные оси сжатия для взбросовых и взбросо-сдвиговых режимов, знаком равенства — главные оси сжатия для сдвиговых режимов, крестами — главные оси растяжения для сбросовых и сбросо-сдвиговых режимов. Механизмы формирования очагов землетрясений взяты из каталогов Республиканского центра сейсмологической службы (РЦСС) Национальной академии наук Азербайджана (НАНА), геофизических служб Российской академии наук, Ирана и Грузии. Учтены также решения фокальных механизмов землетрясений по данным Геологической службы США (USGS), Гарвардского каталога механизмов очагов землетрясений (СМТ), Германского исследовательского центра по геологическим наукам (GFZ), Объединенного международного института по сейсмологии (IRIS), Всемирной карты напряжений (WSM), Европейского средиземноморского сейсмологического центра (EMSC).

летрясений совпадают с зонами напряженного состояния, которые формируются под воздействием топографических аномалий Кавказского региона. Учет топографических аномалий при анализе напряженно-деформированного состояния на различных глубинах путем изучения распределения горизонтальных составляющих напряжений позволяет получать более достоверные данные для дальнейшего прогноза напряженно-деформированного состояния и определения изменения геодинамического режима земной коры в регионе. Отчетливо прослеживается влияние рельефа земной поверхности на распределение напряжений на глубине (или до) 100 км, где наблюдается уменьшение напряжений рас-

тяжения и сжатия, вызванное воздействием локальных топографических сил.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда развития науки при Президенте Азербайджанской республики в Институте геологии и геофизики НАН Азербайджана в отделе “Геодинамика и сейсмология” в рамках гранта EIF-KETPL-2015-1(25)-56/2/2 “Исследование геодинамической и вулканической активности, напряженно-деформированного состояния территории Азербайджана”. Авторы выражают благодарность проф. Технологического института Карлсруэ (Германия) Биргит Мюллер за ценные советы и рекомендации на различных этапах исследования.

Список литературы

- Ахмедбейли Ф. С., Мамедов А. В., Ширинов Н. Ш., Шихалибейли Э. Ш. Неотектоническая карта Азербайджана. М-б 1 : 500 000. Баку: ГКГК, Бакинская картфабрика, 1991.
- Беляков Н. А. Геомеханическое обоснование параметров крепления железнодорожных тоннелей в условиях Северного Кавказа. *Записки Горного института*. 2010. Т. 186. С. 99—103.
- Кадиров Ф. А., Кадыров А. Г., Бабаев Г. Р., Агаева С. Т., Мамедов С. К., Гарагезова Н. Р., Сафаров Р. Т. Сейсмическое районирование южного склона Большого Кавказа по фрактальным особенностям землетрясений, напряженному состоянию и по данным GPS скоростей. *Физика Земли*. 2013. № 4. С. 111—119. doi: 10.7868/S0002333713040046.
- Коптев А., Еришов А. Численное моделирование термального состояния литосферы, распределения внутриплитных напряжений в литосферных складках Черноморско-Кавказско-Каспийского региона. *Бюлл. Моск. об-ва испытателей природы. Отд. геологии*. 2011. Т. 86. Вып. 5. С. 3—11.
- Лиlienберг Д. А. Опыт комплексного картирования современной геодинамики (на примере Азербайджанской ССР). В кн.: *Современные движения земной коры. Теория, методы, прогноз*. Москва: Наука, 1980. С. 65—76.
- Лиlienберг Д. А., Гусейнзаде О. Д., Кулиев Ф. Т., Ширинов Н. Ш., Яценко В. Р. Комплексные исследования современных тектонических движений на геологических полигонах Азербайджана. В кн.: *Современные движения земной коры. Теория, методы, прогноз*. Москва: Наука, 1980. С. 165—174.
- Протосеня А. Г., Беляков Н. А. Определение пространственного напряженно-деформированного состояния временной крепи железнодорожного тоннеля с учетом влияния рельефа земной поверхности. *Известия ТГГУ. Науки о Земле*. 2011. Вып. 1. С. 158—166.
- Ребецкий Ю. Л. Новые данные о природных напряжениях в области подготовки сильного землетрясения. Модель очага землетрясения. *Геофиз. журн*. 2007. Т. 29. № 6. С. 92—110.
- Ребецкий Ю. Л., Кучай О. А., Маринин А. В. Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саянской горной области. *Геология и геофизика*. 2013. Т. 54. № 2. С. 271—291.
- Шенгеля Г., 1984. Гравитационная модель земной коры Кавказа. Москва: Наука, 128 с.
- Яценко В. Р. Геодезические исследования вертикальных движений земной коры. Москва: Недра, 1989. 192 с.
- Agayeva S., 2006. Stress state of the Earth's crust in Azerbaijan. Recent geodynamics, georisk and sustainable development in the Black Sea to Caspian Sea region: *Conference proceedings of American Institute of Physics, Melville, New-York, USA*. Vol. 825, P. 97—102.
- Agayeva S. T., Babayev G. R., 2009. Analysis of earthquake focal mechanisms for Greater and Lesser Caucasus applying the method of World Stress Map. Azerbaijan National Academy of Sciences. In: *Proceedings of Geology Institute*. Baku: Naf-ta-Press, № 2, P. 40—44.
- Alizadeh A. A., Guliyev I. S., Kadirov F. A., Eppelbaum L. V., 2016. Geosciences of Azerbaijan. Vol. I: Geology. Springer Int. Publ. 340 p. doi: 10.1007/978-3-319-27395-2.239.
- Babayev G. R., 2009. Analysis of earthquake focal mechanisms for Greater and Lesser Caucasus applying the method of World Stress Map, Azerbaijan National Academy of Science. Catalogue of Azerbaijan Republican Seismological Center, P. 67—74.
- Bada G., Horváth F., Cloetingh S., Coblenz D. D., Tyth T., 2001. Role of topography-induced gravitational stresses in basin inversion: The case study of the Pannonian basin. *Tectonics* 20, 343—363.
- Bada G., Horváth F., Tyth L., Fodor L., Timár G., Cloetingh S., 2005. Societal aspects of ongoing deformation in the Pannonian region. In: N. Pinter, Gy. Grencsny, J. Weber, S. Stein, D. Medak (Eds). *The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics, and Hazards*. NATO ARW Series. Vol. 61. Kluwer Academic Publishers, P. 385—402.

- Ismail-Zadeh A., Müller B., Schubert G., 2005. Three-dimensional numerical modeling of contemporary mantle flow and tectonic stress beneath the earthquake-prone southeastern Carpathians based on integrated analysis of seismic, heat flow and gravity data. *Phys. Earth. Planet. Int.* 149(1), 81—98. doi: 10.1016/j.pepi.2004.08.012.
- Fleitout L., Froidevaux C., 1982. Tectonics and topography for a lithosphere containing density heterogeneities. *Tectonics* 1, 21—56.
- Hashimoto M., 1982. Numerical Modeling of the Three-dimensional Stress Field in Southwestern Japan. *Tectonophysics* 84, 247—266.
- Heidbach O., Barth A., Connolly P., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Sperner B., Tingay M., Wenzel F., 2004. Stress Maps in a Minute: The 2004 World Stress Map Release. *Eos Trans.* 85, 521—529.
- Heidbach O., Tingay M., Barth A., Reinecker J., Kurfes D., Müller B., 2008. The World Stress Map database release. doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel2008.
- Kadirov A. G., Agayeva S. T., Aliyev F. A., Mamedov S. K., Babayev G. R., Kadirov F. A., 2009. Monitoring and seismicity of collision zone of Azerbaijan part of Greater Caucasus. Azerbaijan National Academy of Sciences: *Proceedings of Geology Institute*. Baku: Nafta-Press, № 3, P. 25—37.
- Kadirov F., 2004. Gravity Model of Lithosphere in the Caucasus-Caspian Region. In: *South Caspian Basin: geology, geophysics, oil and gas content*. Baku: Nafta Press, P. 107—123.
- Kadirov F. A., Floyd M. A., Alizadeh A., Guliev I., Reilinger R. E., Kuleli S., King R. W., Toksoz M. N., 2012. Kinematics of the Caucasus near Baku, Azerbaijan. *Nat. Hazards* 63, 997—1006. doi: 10.1007/s11069-012-0199-0.
- Kadirov F. A., Floyd M., Reilinger R., Alizadeh A. A., Guliyev I. S., Mammadov S. G., Safarov R. T., 2015. Active geodynamics of the Caucasus region: implications for earthquake hazards in Azerbaijan: *Proceedings of the Geology and Geophysics Institute*, № 3, P. 3—17.
- Kadirov F., Mammadov S., Reilinger R., McClusky S., 2008. Some new data on modern tectonic deformation and active faulting in Azerbaijan (according to Global Positioning System measurements): *Proceedings Azerbaijan National Academy of Sciences*. Vol. 1. P. 82—88.
- Kreemer C., Blewitt G., Klein E., 2014. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3849—3889. doi: 10.1002/2014GC005407.
- Lanbo L., Zoback M., 1992. The effect of topography on the state of stress in the Crust: Application to the site of the Cajon Pass scientific drilling project. *J. Geophys. Res.* 97(B4), 5095—5108.
- McKenzie D. P., 1972. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 30, 239—243.
- Molnar P., Lyon-Caen H., 1988. Some simple physical aspects of the support, structure, and evolution of mountain belts. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 218, 179—207.
- National Geophysical Data Center, 1988. ETOPO5 bathymetry and topography data. Data Announce. 88-MGG-02. NOAA. Boulder. Colorado.
- Nemcok M., Feyzullayev A., Kadirov A., Zeynalov G., Allen R., Christensen C., Welker B., 2011. Neotectonics of the Caucasus and Kura valley, Azerbaijan. *Global Engineers & Technologist Review* 1(1), 1—14.
- Nilforoushan F., Masson F., Vernant P., Vigny C., Martinod J., Abbassi M., Nankali H., Hatzfeld D., Bayer R., Tavakoli F., Ashtiani A., Doerflinger E., Daignieres M., Collard P., Chery J., 2003. GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran. *J. Geod.* 77, 411—422. doi: 10.1007/s00190-003-0326-5.
- Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov A., 1989. The Caucasus: An actual example of the initial stages of continental collision. *Tectonophysics* 161, 1—21.
- Randolph M., Krasovec M. L., Romer S., Toksöz M. N., Kuleli S., Gülen L., Vergino E. S., 2015. The Caucasus seismic information network study and its extension into Central Asia. *27<sup>th</sup> Seismic Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*. P. 71—78.

- Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence Sh. et al., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *J. Geophys. Res.* 111(B5), B05411. doi: 10.1029/2005JB004051.
- Ruppel C., McNutt M., 1990. Regional compensation of the Greater Caucasus mountains based on an analysis of Bouguer gravity data. *Earth Planet. Sci. Lett.* 98, 360—379.
- Sengor A. M. C., Gorur N., Saroglu F., 1985. Strike slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, in: Strike slip Faulting and Basin Formation. *Soc. Econ. Paleont. Min. Spec. Publ.* 37, 227—264.
- Telesca L., Lovallo M., Babayev G., Kadirov F., 2013. Spectral and informational analysis of seismicity: an application to the 1996—2012 seismicity of Northern Caucasus-Azerbaijan part of Greater Caucasus-Kopet Dag Region. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 392(23), 6064—6078. doi: 10.1016/j.physa.2013.07.031.
- Yamasaki T., Seno T., 2005. High strain rate zone in central Honshu resulting from the viscosity heterogeneities in the crust and mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.* 232, 13—27. doi: 10.1016/j.epsl.2005.01.015.
- Yetirmishli G. J., Mammadli T. Y., Kazimova S. E., 2013. Features of seismicity of Azerbaijan part of the Greater Caucasus. *Journal of Georgian Geophysical Society, Issue (A), Physics of Solid Earth* 16a, 55—60.
- Zoback M., 1992. First and second order patterns of tectonic stress: The World Stress Map Project. *J. Geophys. Res.* 97, 11703—11728.
- Zoback M., Mooney W., 2003. Lithospheric Buoyancy and Continental Intraplate Stresses. *Int. Geol. Rev.* 45, 95—118.

## Analysis of stress-strain state of Caucasus region (Azerbaijan) on the basis of maximum horizontal stress vectors and “World Stress Map” application technique

© G. R. Babayev, E. V. Akhmedova, F. A. Kadirov, 2017

The influence of topographic anomaly of the relief on the stress-strain state of the Caucasus lithosphere (Azerbaijan) and plotting the respective models have been considered in the paper. Stress-strain state was studied by the finite element method with the application of software packages Hypermesh™ and Abaqus™. Based on the plotted models of stress-strain state of lithosphere, the orientations and localization of the horizontal stress axes at the various lithosphere depths were determined. The correlation of those stress axes was done with the stress map plotted on the basis of focal mechanism solutions of the earthquake occurred in Azerbaijan within the period of 1990—2015 years with the application of CASMO (“World Stress Map”) technique. Mainly western and central parts of Greater Caucasus ridge are characterized by northeastern—southwestern tension. In the eastern part, the tension reverses into intensive compression. In the studied region, earthquakes are predominantly thrust-faulting with a number of normal-faulting and some strike-slip faulting. The consideration of the topographic anomalies at analysis of stress-strain state at the various lithosphere depth levels will allow obtaining more reliable data for the plotting of geodynamic model of the region. Such researches are necessary to be conducted at the construction of the strategic facilities, especially underground constructions (mines, tunnels, underground pipelines, terminals) since it is important to consider as many factors as possible affecting the formation of the stress-strain state of the Earth’s crust.

**Key words:** topographic anomalies, Greater and Lesser Caucasus, mechanisms of formation of earthquakes foci, stress-strain state, vectors of maximal horizontal strains, World Stress Map.

References

- Akhmedbeyli F. S., Mamedov A. V., Shirinov N. Sh., Shikhalibeyli E. Sh., 1991. Neotectonic Map of Azerbaijan. 1: 500 000. Baku: Bakinskaya kartfabrika (in Russian).
- Belyakov N. A., 2010. Geomechanical substantiation of the parameters of fastening of railway tunnels in the conditions of the North Caucasus. *Zapiski Gornogo instituta* 186, 99—103 (in Russian).
- Kadirov F. A., Gadirov A. G., Babayev G. R., Agayeva S. T., Mamedov S. K., Garagezova N. R., Safarov R. T., 2013. Seismic zoning of the southern slope of Greater Caucasus from the fractal parameters of the earthquakes, stress state and GPS velocities. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth* 49(4), 554—562 (in Russian). doi: 10.1134/S1069351313040046.
- Koptev A., Yershov A., 2011. Numerical modeling of the thermal state of the lithosphere, distribution of intraplate stresses in the lithospheric folds of the Black Sea-Caucasian-Caspian region. *Byulleten Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otd. geologii* 86(is. 5), 3—11 (in Russian).
- Liliyenberg D. A., 1980. Experience of complex mapping of modern geodynamics (on the example of the Azerbaijan SSR). In: *Modern movements of the Earth's crust. Theory, methods, forecast*. Moscow: Nauka, P. 65—76 (in Russian).
- Liliyenberg D. A., Guseynzade O. D., Kuliyeu F. T., Shirinov N. Sh., Yashchenko V. R., 1980. Complex studies of modern tectonic movements on geological polygons of Azerbaijan. In: *Modern movements of the Earth's crust. Theory, methods, forecast*. Moscow: Nauka, P. 165—174 (in Russian).
- Protosenya A. G., Belyakov N. A., 2011. Determination of the stress-strain state of the temporary support of the railway tunnel taking into account the influence of the relief of the Earth's surface. *Izvestiya TklGU. Nauki o Zemle* (is. 1), 158—166 (in Russian).
- Rebetskiy Yu. L., 2007. New data on natural stresses in the field of preparation of a strong earthquake. Model of the source of the earthquake. *Geofizicheskiy zhurnal* 29(6), 92—110 (in Russian).
- Rebetskiy Yu. L., Kuchay O. A., Marinin A. V., 2013. Stress state and deformation of the Earth's crust of the Altai-Sayan mountain region. *Geologiya i geofizika* 54(2), 271—291 (in Russian).
- Shengelaya G., 1984. Gravitational model of Earth's crust of Caucasus. Moscow: Nauka, 128 p. (in Russian).
- Yashchenko V. R., 1989. Geodesic investigations of vertical movements of the Earth's crust. Moscow: Nedra, 192 p. (in Russian).
- Agayeva S., 2006. Stress state of the Earth's crust in Azerbaijan. Recent geodynamics, georisk and sustainable development in the Black Sea to Caspian Sea region: *Conference proceedings of American Institute of Physics, Melville, New-York, USA*. Vol. 825, P. 97—102.
- Agayeva S. T., Babayev G. R., 2009. Analysis of earthquake focal mechanisms for Greater and Lesser Caucasus applying the method of World Stress Map. Azerbaijan National Academy of Sciences. In: *Proceedings of Geology Institute*. Baku: Naf-ta-Press, № 2, P. 40—44.
- Alizadeh A. A., Guliyev I. S., Kadirov F. A., Eppelbaum L. V., 2016. Geosciences of Azerbaijan. Vol. I: Geology. Springer Int. Publ. 340 p. doi: 10.1007/978-3-319-27395-2.239.
- Babayev G. R., 2009. Analysis of earthquake focal mechanisms for Greater and Lesser Caucasus applying the method of World Stress Map, Azerbaijan National Academy of Science. Catalogue of Azerbaijan Republican Seismological Center, P. 67—74.
- Bada G., Horváth F., Cloetingh S., Coblenz D. D., Tyth T., 2001. Role of topography-induced gravitational stresses in basin inversion: The case study of the Pannonian basin. *Tectonics* 20, 343—363.
- Bada G., Horváth F., Tyth L., Fodor L., Timár G., Cloetingh S., 2005. Societal aspects of ongoing deformation in the Pannonian region. In: *N. Pinter, Gy. Grenczy, J. Weber, S. Stein, D. Medak (Eds). The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics, and Hazards*. NATO ARW Series. Vol. 61. Kluwer Academic Publishers, P. 385—402.
- Ismail-Zadeh A., Müller B., Schubert G., 2005. Three-dimensional numerical modeling of contemporary mantle flow and tectonic stress beneath the earth-

- quake-prone southeastern Carpathians based on integrated analysis of seismic, heat flow and gravity data. *Phys. Earth. Planet. Int.* 149(1), 81—98. doi: 10.1016/j.pepi.2004.08.012.
- Fleitout L., Froidevaux C., 1982. Tectonics and topography for a lithosphere containing density heterogeneities. *Tectonics* 1, 21—56.
- Hashimoto M., 1982. Numerical Modeling of the Three-dimensional Stress Field in Southwestern Japan. *Tectonophysics* 84, 247—266.
- Heidbach O., Barth A., Connolly P., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Sperner B., Tingay M., Wenzel F., 2004. Stress Maps in a Minute: The 2004 World Stress Map Release. *Eos Trans.* 85, 521—529.
- Heidbach O., Tingay M., Barth A., Reinecker J., Kurfes D., Müller B., 2008. The World Stress Map database release. doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel2008.
- Kadirov A. G., Agayeva S. T., Aliyev F. A., Mamedov S. K., Babayev G. R., Kadirov F. A., 2009. Monitoring and seismicity of collision zone of Azerbaijan part of Greater Caucasus. Azerbaijan National Academy of Sciences: *Proceedings of Geology Institute*. Baku: Nafta-Press, № 3, P. 25—37.
- Kadirov F., 2004. Gravity Model of Lithosphere in the Caucasus-Caspian Region. In: *South Caspian Basin: geology, geophysics, oil and gas content*. Baku: Nafta Press, P. 107—123.
- Kadirov F. A., Floyd M. A., Alizadeh A., Guliev I., Reilinger R. E., Kuleli S., King R. W., Toksoz M. N., 2012. Kinematics of the Caucasus near Baku, Azerbaijan. *Nat. Hazards* 63, 997—1006. doi: 10.1007/s11069-012-0199-0.
- Kadirov F. A., Floyd M., Reilinger R., Alizadeh A. A., Guliyev I. S., Mammadov S. G., Safarov R. T., 2015. Active geodynamics of the Caucasus region: implications for earthquake hazards in Azerbaijan: *Proceedings of the Geology and Geophysics Institute*, № 3, P. 3—17.
- Kadirov F., Mammadov S., Reilinger R., McClusky S., 2008. Some new data on modern tectonic deformation and active faulting in Azerbaijan (according to Global Positioning System measurements): *Proceedings Azerbaijan National Academy of Sciences*. Vol. 1. P. 82—88.
- Kreemer C., Blewitt G., Klein E., 2014. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3849—3889. doi: 10.1002/2014GC005407.
- Lanbo L., Zoback M., 1992. The effect of topography on the state of stress in the Crust: Application to the site of the Cajon Pass scientific drilling project. *J. Geophys. Res.* 97(B4), 5095—5108.
- McKenzie D. P., 1972. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 30, 239—243.
- Molnar P., Lyon-Caen H., 1988. Some simple physical aspects of the support, structure, and evolution of mountain belts. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 218, 179—207.
- National Geophysical Data Center, 1988. ETOPO5 bathymetry and topography data. Data Announce. 88-MGG-02. NOAA. Boulder. Colorado.
- Nemcok M., Feyzullayev A., Kadirov A., Zeynalov G., Allen R., Christensen C., Welker B., 2011. Neotectonics of the Caucasus and Kura valley, Azerbaijan. *Global Engineers & Technologist Review* 1(1), 1—14.
- Nilforoushan F., Masson F., Vernant P., Vigny C., Martinod J., Abbassi M., Nankali H., Hatzfeld D., Bayer R., Tavakoli F., Ashtiani A., Doerflinger E., Daignieres M., Collard P., Chery J., 2003. GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran. *J. Geod.* 77, 411—422. doi: 10.1007/s00190-003-0326-5.
- Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov A., 1989. The Caucasus: An actual example of the initial stages of continental collision. *Tectonophysics* 161, 1—21.
- Randolph M., Krasovec M. L., Romer S., Toksöz M. N., Kuleli S., Gülen L., Vergino E. S., 2015. The Caucasus seismic information network study and its extension into Central Asia. *27<sup>th</sup> Seismic Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*. P. 71—78.
- Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence Sh. et al., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *J. Geophys. Res.* 111(B5), B05411. doi: 10.1029/2005JB004051.
- Ruppel C., McNutt M., 1990. Regional compensation of the Greater Caucasus mountains based on

- an analysis of Bouguer gravity data. *Earth Planet. Sci. Lett.* 98, 360—379.
- Sengor A. M. C., Gorur N., Saroglu F., 1985. Strike slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, in: Strike slip Faulting and Basin Formation. *Soc. Econ. Paleont. Min. Spec. Publ.* 37, 227—264.
- Telesca L., Lovallo M., Babayev G., Kadirov F., 2013. Spectral and informational analysis of seismicity: an application to the 1996 — 2012 seismicity of Northern Caucasus-Azerbaijan part of Greater Caucasus-Kopet Dag Region. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 392(23), 6064—6078. doi: 10.1016/j.physa.2013.07.031.
- Yamasaki T., Seno T., 2005. High strain rate zone in central Honshu resulting from the viscosity heterogeneities in the crust and mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.* 232, 13—27. doi: 10.1016/j.epsl.2005.01.015.
- Yetirmishli G. J., Mammadli T. Y., Kazimova S. E., 2013. Features of seismicity of Azerbaijan part of the Greater Caucasus. *Journal of Georgian Geophysical Society, Issue (A), Physics of Solid Earth* 16a, 55—60.
- Zoback M., 1992. First and second order patterns of tectonic stress: The World Stress Map Project. *J. Geophys. Res.* 97, 11703—11728.
- Zoback M., Mooney W., 2003. Lithospheric Buoyancy and Continental Intraplate Stresses. *Int. Geol. Rev.* 45, 95—118.