

Глубинное строение и геодинамические особенности земной коры западного побережья Каспийского моря

А. Г. Кадыров, Г. Р. Садыгова, С. Т. Агаева, 2018

Институт геологии и геофизики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан
Поступила 21 февраля 2018 г.

Наведено 2D гравітаційну модель по геодинамічному профілю Самур—Баку, розташованому на західному узбережжі Каспійського моря. Вивчено геодинамічні характеристики кори в районі профілю. 2D гравітаційна модель складена методом підбору густинних меж. Проведено уточнення межі нижнього шару кори (28—32 км) і поверхні поділу Мохо (47—57 км). Уздовж профілю проаналізовано криві швидкості сучасних вертикальних і горизонтальних рухів. За кривими швидкості сучасних вертикальних рухів на межі піднімання і опускання земної кори виділено місця акумуляції напруженості за профілем. Показано також, що вздовж профілю основні зони акумуляції напружень розміщуються у безпосередній близькості від пунктів Худат, Чархи, Сіазань і Баку. Середнє значення швидкості деформації між двома GPS точками обчислено шляхом ділення різниці швидкостей на відстань між цими точками. Встановлено, що зона найбільшої швидкості деформації (97,5 nanostrain/рік) збігається із зоною Сіазанського розлому, зона Гусар-Шабранського крайового прогину характеризується швидкістю деформації 22,3 nanostrain/рік. Низька швидкість деформації (8,9 nanostrain/рік) збігається із зоною Шамаха-Гобустанського синклінорію. Зони концентрування напружень у гравітаційній моделі відповідають виступам по поверхні верхнього і нижнього шарів консолідованої кори і зафіксовані гіпоцентрами землетрусів. Визначено радіуси осередків землетрусів, що створюють додаткові відчутні напруження, які впливають на геодинамічні умови кори в районі профілю.

Ключові слова: Південно-Східний Кавказ, гравітаційна модель, епіцентр, землетрус, розлом, GPS швидкості, напруження.

Введение. Исследование глубинного строения вдоль региональных геофизических профилей (геотравверсов) является одним из приоритетных направлений геологии [Хаин, 1979; Пучков, 2000; Ермаков, Лыгин, 2006; Старостенко и др., 2008; Козленко, Козленко, 2013; 2016; Рязанцев, Кошелева, 2017; Старостенко и др., 2017]. Проблема строения земной коры и происхождения Гусар-Шабранского (Дивичинского) прогиба привлекает внимание многих исследователей в связи с тектоникой плит, геологической историей региона, поисками и прогнозированием минеральных ресурсов.

Актуальность исследования Гусар-Шабранского прогиба определяется не только

в связи с фундаментальной проблемой изучения его формирования и динамики, но и практическими задачами, связанными с перспективами обнаружения нефтяных и газовых месторождений, а также с изучением геодинамической опасности для нефтепровода Баку—Новороссийск и водопроводов Шоллар и Тахтакерпю и других инфраструктур в этом регионе. Несмотря на большой объем геолого-геофизических работ, многие вопросы по глубинной тектонике и геодинамике региона, имеющего сложное и изменчивое строение земной коры, остаются нерешенными. Изучению глубинного строения, тектоники и геодинамики Гусар-Шабранского прогиба посвящено много исследований и крупных

научных обобщений [Хаин, Ахмедбейли, 1957; Абдуллаев, Джафаров, 1962; Гаджиев, 1965; Краснопевцева, 1978; Амирасланов, 1986; Кадиров, 2000; Ахмедбейли и др., 2010].

Цель настоящей статьи — получение новой информации об особенностях строения земной коры и геодинамики вдоль профиля Самур—Баку. В качестве исходных материалов для получения разреза были использованы сейсмологические, геофизические и геологические данные

по профилю Самур—Баку, пересекающему Гусар-Шабранский прогиб.

Геологический очерк исследуемого района. В пределах Юго-Восточного Кавказа выделяется ряд крупных тектонических элементов: Гусар-Шабранский краевой прогиб, Гусарское погребенное поднятие, северное крыло Центрального поднятия (Тфанский антиклинорий), Шагдаг-Хызынский синклинорий, Тенги-Бешбармакский антиклинорий, Закатала-Ковдакский синклинорий, Яшминский синк-

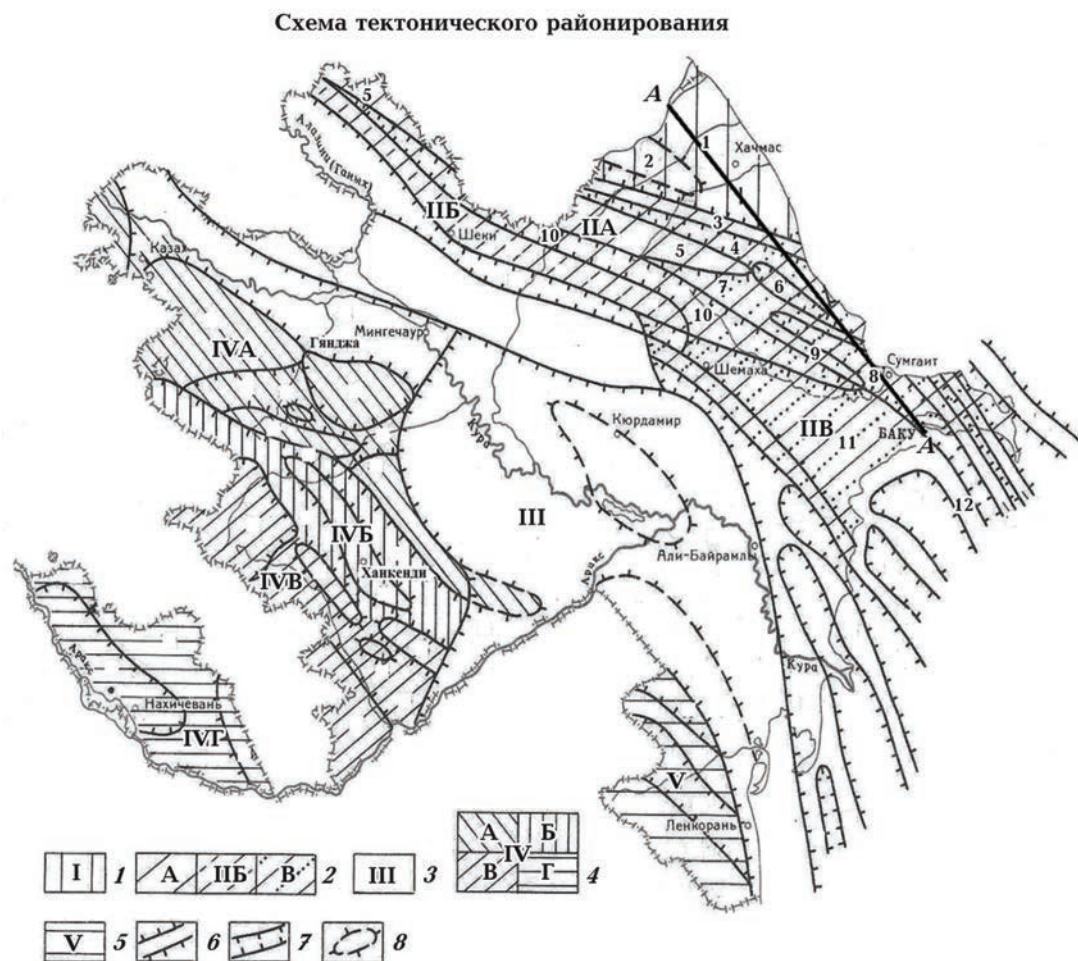


Рис. 1. Схема тектонического районирования Азербайджана: 1 — Предкавказский краевой прогиб; 2 — мегантиклинорий Большого Кавказа (IIА — миогеосинклиальная зона, IIБ — Вандамская зона, IIВ — Юго-Восточный Кавказ); 3 — Кури́нская межгорная впадина; 4 — мегантиклинорий Малого Кавказа (IVА — Сомхито-Агдамская зона, IVБ — Севано-Карабахская зона, IVВ — Мисхано-Кафанская зона, IVГ — Араксинская зона); 5 — Талы́шская складчатая зона; 6, 7 — границы антиклинориев (6), синклинориев (7); 8 — контуры крупных гравитационных максимумов. Тектонические структуры: 1 — Гусар-Шабранский краевой прогиб; 2 — Гусарское погребенное поднятие; 3 — Тенги-Бешбармакский антиклинорий; 4 — Шагдаг-Хызынский синклинорий; 5 — Тфанский антиклинорий; 6 — Яшминский синклинорий; 7 — Куркачидагский антиклинорий; 8 — Вегверский синклинорий; 9 — Юнусдагский антиклинорий; 10 — Закатала-Ковдакский синклинорий; 11 — Шамахино-Гобустанский синклинорий; 12 — Бибиэйбатский антиклинальный пояс; AA — профиль Самур—Баку.

линорий, Куркачидагский антиклинорий, Вегверский синклинорий, Юнусдагский антиклинорий, Шамахино-Гобустанский синклинорий и Бибиэйбатский антиклинальный пояс. Подобное структурное подразделение отражено на тектонической карте Азербайджана, изданной в 1980 г. [Ali-zade et al., 1982]. Кроме первой из названных структур, все остальные расположены в средне- и высокогорной зоне (рис. 1).

Гусар-Шабранский краевой прогиб сформировался в позднем миоцене—раннем плиоцене в результате погружения структур северного борта поднятия Бокского хребта и Внешней зоны Горного Дагестана в юго-восточном направлении после формирования Самурского (Агдаш-Дербендского) разлома. Флексурное погружение четко проявлено в верховьях р. Навчачай, где полого залегающие верхнеюрские образования северного крыла Судурской зоны, резко изгибаясь, уходят под мощные гравийно-галечниковые отложения раннего плиоцена. Несколько южнее в основании плиоцена обнажаются образования понта и сармата. Южная граница прогиба контролируется Сиазаньским разломом (и его ветвью), вдоль которого поверхность мезозойского основания прогиба на участке к юго-востоку от р. Гарачай опущена, а кайнозойский чехол частично перекрыт надвинутыми с юга образованиями мела. При этом меловые и верхнеюрские образования Судурской зоны испытывают погружение уже в меридиональном направлении. Восточнее р. Гарачай судурские известняки обнажаются на поверхности лишь узкой полосой в шовной зоне Сиазаньского разлома.

Сиазаньский глубинный разлом протяженностью 135—140 км ориентирован с северо-запада на юго-восток, сейсмически достаточно активен, к нему приурочены эпицентры землетрясений. Разграничивает два резко различающихся блока — Гусар-Шабранский краевой прогиб и Шагдаг-Хызынский синклинорий. Амплитуда смещения (опускания) первого по отношению ко второму составляет

1300—1600 м, что связано с неотектоническими движениями. Между названными структурами протягивается очень узкая (75 км длины) Тенги-Бешбармакская антиклинальная зона кордильерского типа (по Кенгерли она представляет структуру шарьяжного типа). Плоскость разлома с глубиной изменяет направление [Геология..., 2005].

Исходный геолого-геофизический разрез. При изучении территории Гусар-Шабранского прогиба большое внимание уделялось геолого-геофизическому разрезу по геодинамическому профилю Самур—Баку, проходящему в восточной части изучаемого района вдоль Каспийского моря. Разрез земной коры (масштаб 1:500 000) был составлен на основе имеющихся геолого-геофизических данных и результатов глубокого бурения (скв. Агзыбирчала) [Шенгелая, 1984, Геофизические..., 1996; Бабаев, Гаджиев, 2006; Отчет..., 2018].

Граница Мохо рассчитана по гравиметрическим данным с использованием формулы Р. М. Деменицкой [Андреев, Клушин, 1965; Деменицкая, 1967].

Для упрощения геолого-геофизического разреза по профилю Самур—Баку многие ярусы, свиты, подотделы и системы были объединены. Отдельные хорошо изученные ярусы с большой мощностью представлены в разрезе самостоятельно. Интерпретация разреза позволила изучить сложное глубинное строение района. Анализ современного состояния геолого-геофизических данных показал, что имеющейся информации зачастую недостаточно для решения задач изучения глубинного строения земной коры региона. Поэтому создание новой 2D плотностной модели коры может дать дополнительную информацию о глубинном строении района.

2D гравитационная модель коры по профилю Самур—Баку представляет собой структурную основу для геодинамических построений. Комплексный анализ аномалий гравитационного поля и результатов GPS-измерений дает ценную информацию о развитии глубинных геодинамических процессов. По величине

гравитационных аномалий и горизонтальных движений определяются напряжения сжатия, воздействующие на литосферные плиты и микроплиты, что приводит к их деформациям и поддвигу на контактах.

В настоящей статье для гравитационного моделирования глубинного строения земной коры и верхней мантии был применен метод подбора [Булах и др., 1984, 1999; Булах, Маркова, 1992; Кадиров, 2000; Егоров, 2004; Булах, 2010; Kadirov, Gadirov, 2014; Козленко, Козленко, 2016].

Такое моделирование проводилось в следующей последовательности: 1) составление исходной плотностной модели на основе априорной информации о физико-геологическом строении района исследований; 2) решение прямой задачи для этой модели; 3) исключение регионального фона; 4) выбор ограничения на геометрические и физические параметры плотностной модели и закрепление достоверных данных; 5) уточнение параметров модели методом подбора; 6) поиск при необходимости новых гравиактивных источников.

В качестве критерия подобия наблюдаемой $g(x_i)$ и подобранной $\Phi(x_i)$ кривых гравитационного поля использована величина

$$F = \sum_{i=1}^n [g(x_i) - \Phi(x_i)]^2 = \min,$$

где x_i — координаты точек наблюдения, n — число точек, используемых при аппроксимации.

На рис. 2 показана 2D гравитационная модель по профилю Самур—Баку.

Значения плотности в земной коре и мантии подбирались по литературным данным [Гаджиев, 1965; Физические..., 1967; Амирасланов, 1986; Павленкова и др., 1991; Сафаров, 2011; Pitarka et al., 2016].

Для построенной плотностной модели была решена прямая задача и получено рассчитанное по ней поле. Решение прямой задачи для исходной модели показывает, что вдоль всего профиля наблюдается избыток масс. На рис. 2, а приведены кривые силы тяжести наблюдаемой аномалии в редукции Буге, рассчитанные по исходной модели разреза профиля и подобран-

ной модели разреза профиля. Вычисленные значения гравитационного поля для начальной геолого-геофизической модели не объясняют наблюдаемое гравитационное поле. Для его компенсации проведен подбор плотностных границ (поверхности верхнего и нижнего слоев кристаллической коры и границы Мохо) до получения наименьшего расхождения между наблюдаемыми и подобранными значениями гравитационного поля.

В северной части профиля, где отмечались наибольшие отклонения в гравитационном поле, поверхность верхней консолидированной коры была опущена на величину до 9 км, нижней коры — до 6 км, а поверхность граница Мохо — до 7 км.

Вдоль профиля Самур—Баку залегание поверхности нижней коры фиксируется на глубине 28—32 км, границы Мохо — на глубине 47—57 км. Максимальное погружение двух границ происходит в районе населенного пункта Зарат.

Современные геодинамические условия вдоль профиля Самур—Баку. Современные вертикальные движения. Впервые на западном побережье Каспийского моря работы по нивелированию проводились военными топографами в 1912 г. В дальнейшем работы повторялись в 1935—1937, 1951, 1971 и 1986 г. Для изучения современных вертикальных движений (СВД) земной поверхности по профилю Самур—Баку, расположенному вдоль западного берега Каспийского моря, использовались результаты двух последних высокоточных нивелировок в районе исследований [Лиленберг, 1980; Гаджиев и др., 1987; Яценко, 1974, 1989; Ахмедбейли и др., 1991; Касьянова, 2003]. Считаем, что за короткое геологическое время, прошедшее после проведения высокоточных нивелирований вдоль профиля, направления СВД земной коры сохранились без особых изменений. СВД земной поверхности по профилю Самур—Баку и распределение очагов землетрясений по глубине показаны на рис. 3 на фоне полученной гравитационной модели.

Анализ скоростей вертикальных движений показывает, что юго-восточная

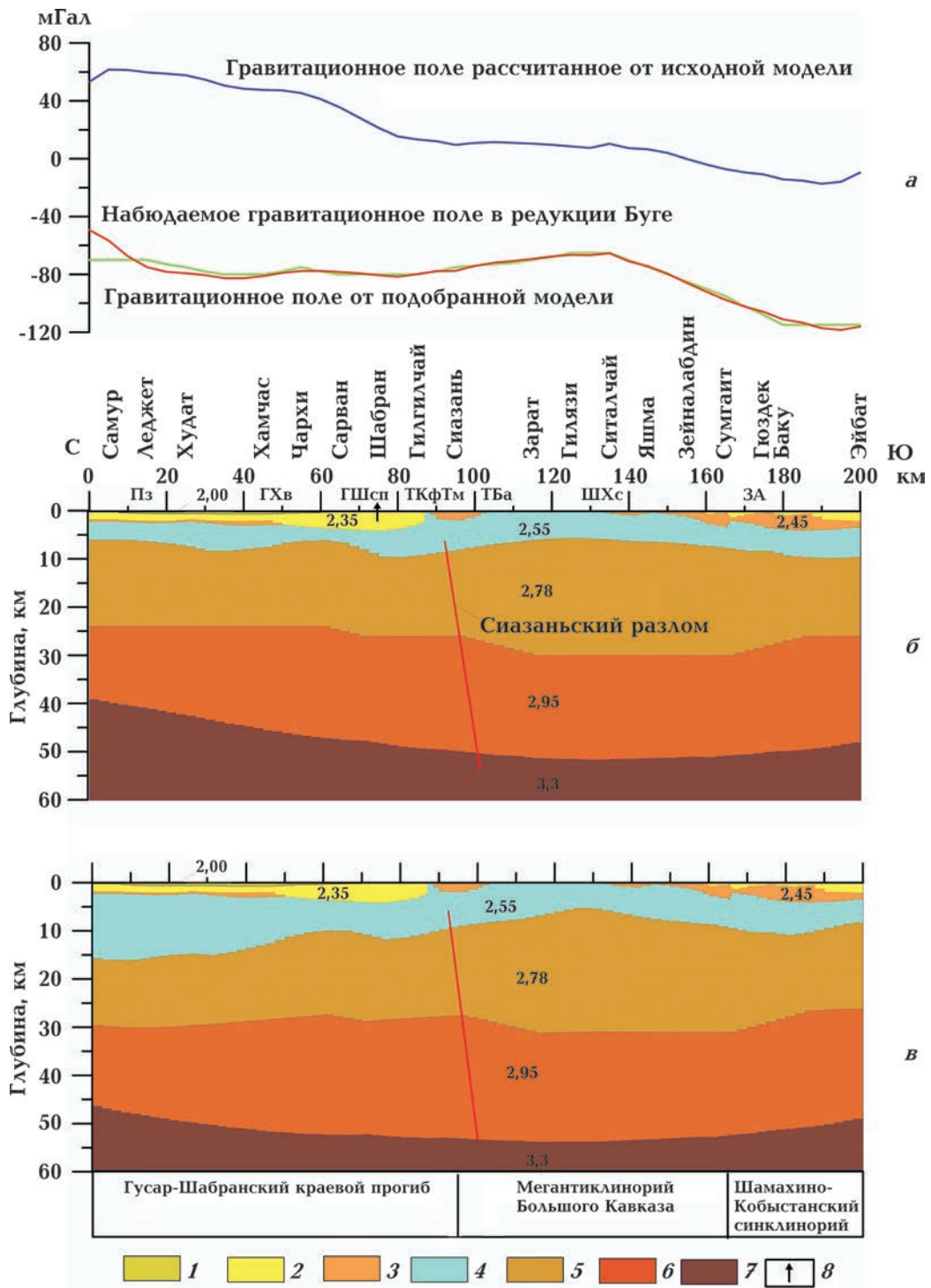


Рис. 2. 2D гравитационная модель по профилю Самур—Баку: *а* — гравитационные поля в редукции Буге (от исходной и подобранной модели), *б* — исходный геолого-геофизический разрез вдоль профиля, *в* — подобранная гравитационная модель; 1 — четвертичные отложения, 2 — неоген, 3 — палеоген, 4 — мезозой, 5 — верхний слой кристаллической коры, 6 — нижний слой, 7 — верхняя мантия, 8 — скважина Агзыбирчала. Цифры — значения плотности в г/см³. Структуры: Пз — Присамурская тектоническая зона, ГХв — Гусар-Хачмасский выступ, ГШсп — Губа — Шабранская синклиальная полоса, ТКф — Талаби-Кызылбурунская флексура, Тм — Третичная моноκлинал, Тба — Тенгинско-Бешбармакский антиκлинорий, ШХс — Шахдаг-Хызынский синκлинорий, ЗА — Западный Абшерон.

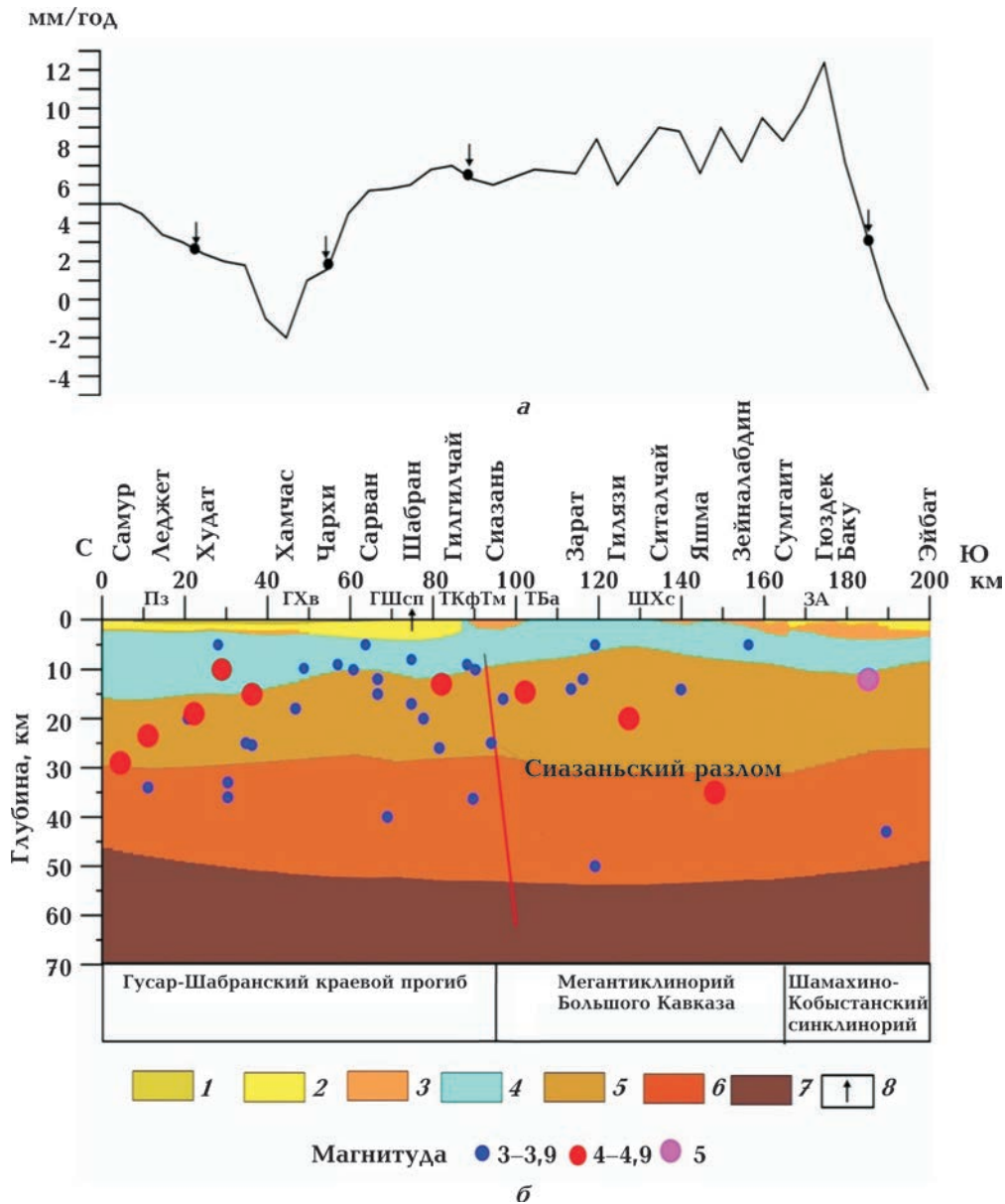


Рис. 3. Кривая вариации современных вертикальных движений земной поверхности по профилю Самур—Баку (а) и распределение очагов землетрясений в коре профиля на фоне его гравитационной модели (б). Условные обозначения см. на рис. 2.

часть Кавказа испытывает опускание от Самура до Хачмаса. Наибольшая скорость опускания (-2 мм/год) отмечена в Хачмасском районе. Участок профиля от Хачмаса до Гюздека характеризуется в основном скоростью поднятия. Скорости СВД в западной части Абшеронского полуострова изменяются от $+12,5$ до $-4,7$ мм/год. Таким образом, наибольший подъем со скоростью $+12,5$ мм/год наблюдается в районе Гюздека. Далее, южнее Гюздека, до пун-

кта Эйбат снова наблюдается опускание с максимальной скоростью в зоне Эйбат ($-4,7$ мм/год). В областях с наиболее интенсивной мезо-кайнозойской складчатостью кривая скорости СВД более дифференцирована, зигзагообразна, что наблюдается в поведении кривой $V_{\Delta h}$ на участке от Сиазани до Баку.

По кривым изменения скорости СВД на границе подъема и опускания земной коры (зоны градиентов скорости СВД) были вы-

делены места аккумуляции напряженности по профилю, которые на рис. 3 отмечены стрелками. Видно, что вдоль профиля основные зоны аккумуляции напряжений находятся в непосредственной близости от пунктов Худат, Чархи, Сиазань и Баку.

Для анализа связи между скоростью СВД и сейсмичностью использовалась информация о землетрясениях, расположенных на расстоянии менее 20 км от профиля Самур—Баку. В выделенных местах концентрации напряжений в гравитационной модели на поверхности верхнего и нижнего слоев коры наблюдаются выступы, и в этих же местах отмечаются гипоцентры землетрясений. На границе Мохоровичича отмечено субгоризонтальное залегание.

GPS-скорости и напряжения. Территория Азербайджана находится в зоне активной коллизии двух континентов —

Африканского и Евразийского [McKenzie, 1972; Sengoretal., 1985; Philip et al., 1989]. Это продолжающееся «вторжение» Аравийской плиты в Евразию обуславливает сокращение литосферы по Главному Кавказскому надвижку, простирающемуся в широтном направлении [McKenzie, 1972; Sengor et al., 1985; Jackson, 1992; Kadirov, 2004; Reilinger et al., 2006; Kadirov et al., 2008, 2012]. Эти региональные тектонические процессы, будучи причиной деформации земной коры, вызывают землетрясения, которые исторически зарегистрированы на всей территории Кавказа.

GPS-измерения в настоящее время являются основным методом исследований деформаций в пределах горных сооружений и глобальных перемещений литосферных плит. В 1998 г. совместными усилиями Института геологии АН Азербайджана и

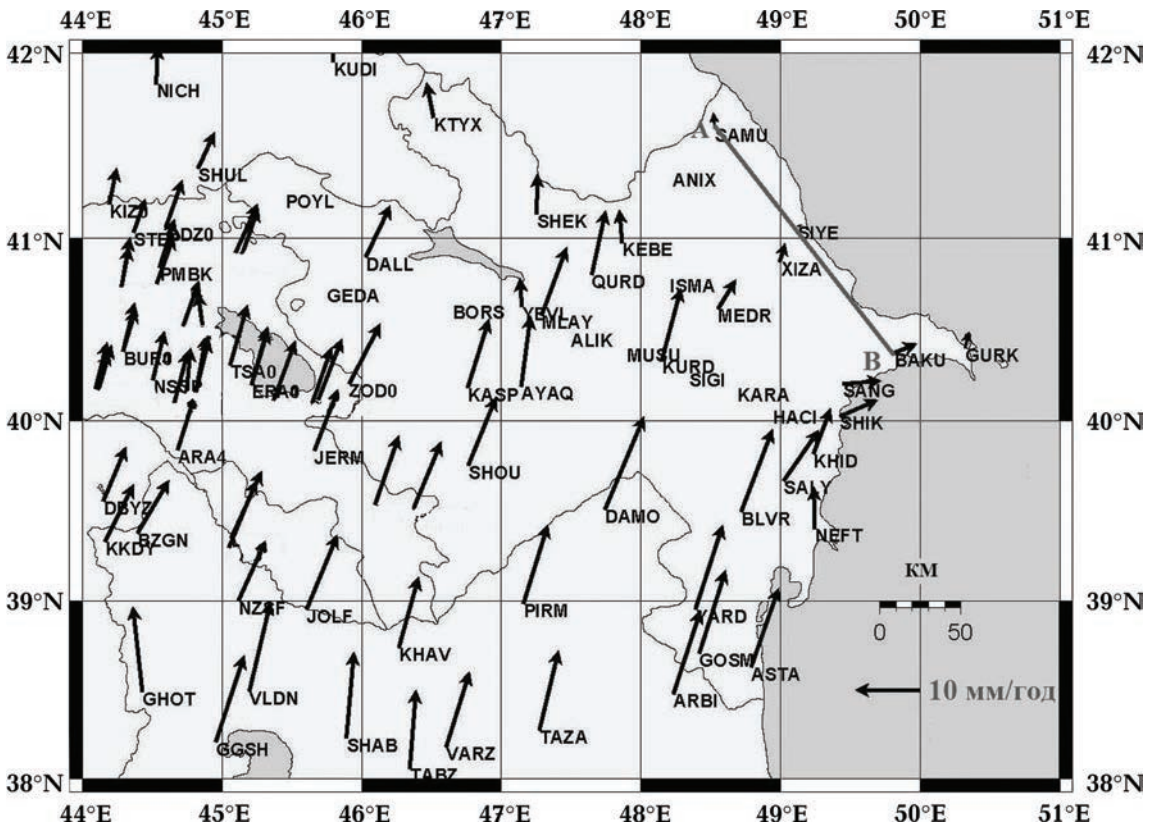


Рис. 4. Карта GPS-скоростей [Кадиров, Сафаров, 2013]. АВ — геодинамический профиль Самур—Баку. Стрелки указывают направление вектора скорости, а значения скорости характеризуются длиной стрелок в соответствии с масштабом, указанным в правом углу карты. Информация о скорости пунктов, расположенных за пределами Азербайджана, взяты из работ [Nilforoushan et al., 2003; Reilinger et al., 2006; Masson et al., 2006].

Массачусетского технологического института (Ф. А. Кадилов и Р. Э. Рейлинджер) был создан Азербайджанский полигон GPS-измерений. Его создание осуществлялось на базе имеющихся гравигеодетических пунктов геодинимических полигонов Азербайджана. С целью изучения современных горизонтальных движений земной поверхности с 1998 г. в Азербайджане проводятся мониторинги GPS-измерений [Reilinger et al., 2006; Kadirov et al., 2012, 2015; Кадилов, Сафаров, 2013].

На карте горизонтальных скоростей GPS для Азербайджанского и Кавказского региона (рис. 4) показан (линией АВ) геодинимический профиль Самур—Баку, ориентированный параллельно Главному Кавказскому надвику.

Данные GPS-наблюдений, проведенных в Азербайджане и на сопредельных территориях, позволяют оценить современные поверхностные движения и связанные с ними деформации земной коры. Наблюдаемые движения (скорости в пунктах

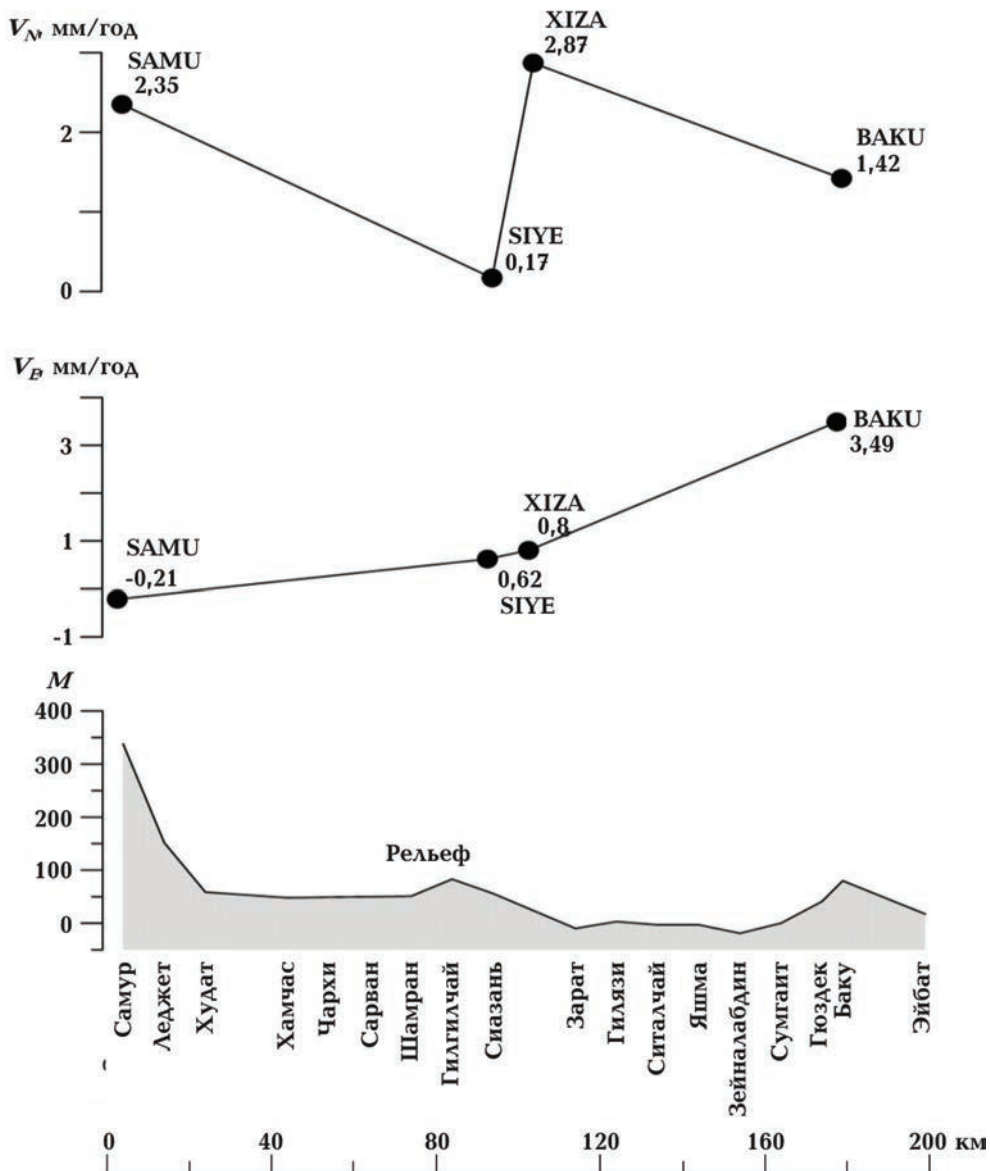


Рис. 5. Изменение рельефа и компоненты скоростей горизонтальных движений (направление на север (V_N) и восток (V_E)) по профилю Самур—Баку.

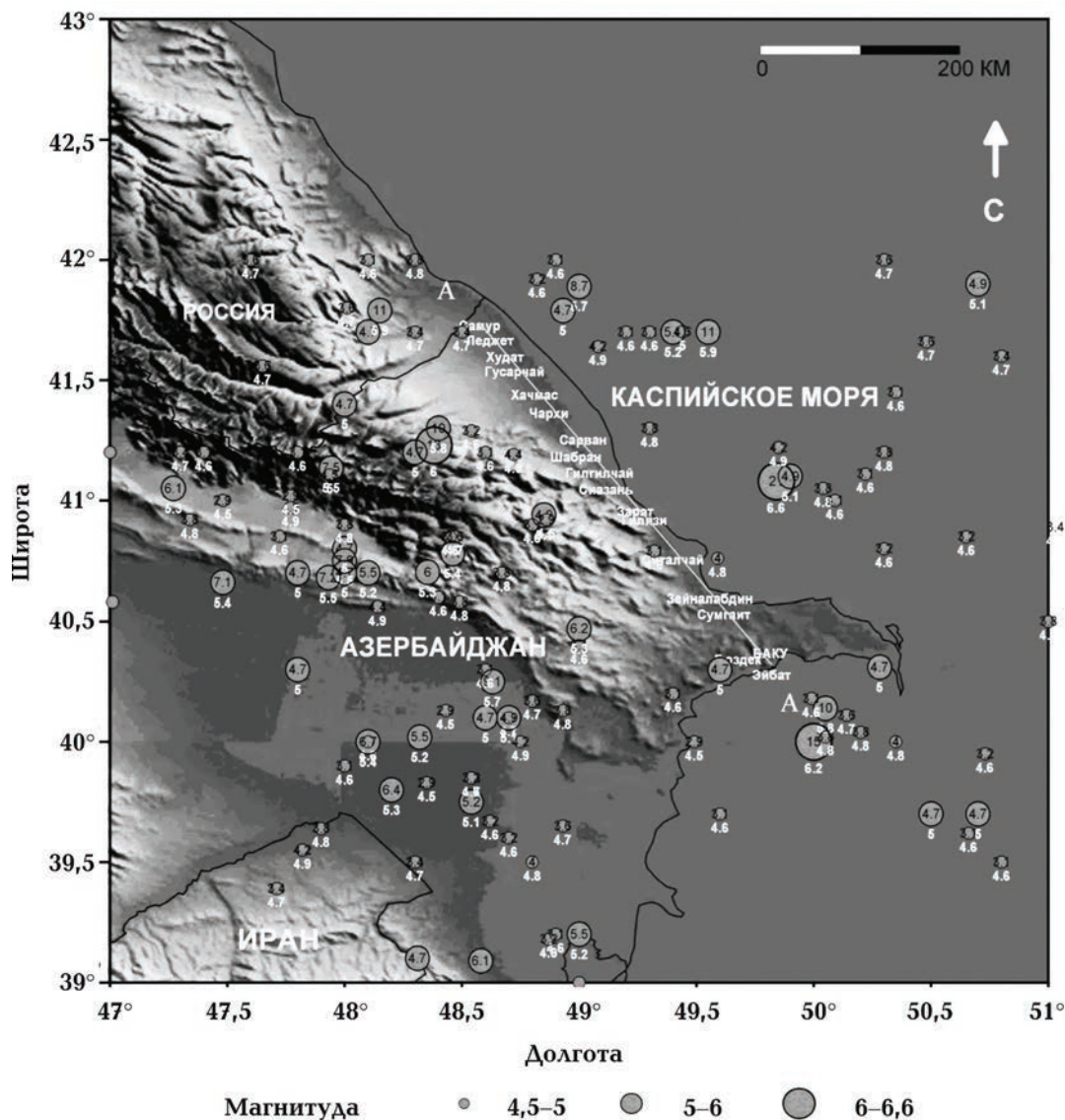


Рис. 6. Карта распределения эпицентров землетрясений Юго-Восточного Кавказа и сопредельных территорий с магнитудами $4,5 \leq M \leq 6,6$ за период 1963—2015 гг. Цифры черного цвета — значения R_{\max} , рассчитанные для землетрясений, цифры белого цвета — магнитуды землетрясений.

наблюдений) дают возможность идентифицировать зоны быстрого накопления напряжения, которое авторы интерпретируют как результат глубинного скольжения по разлому, запертому на той или иной глубине земной коры. Вероятно, в будущем они могут вызвать землетрясения.

По мере приближения к Большому Кавказскому надвигу уменьшение значений скорости в GPS-пунктах интерпретируется как одна из причин накопления напряже-

ний на этом надвиге. Сокращение земной коры в горизонтальном направлении происходит в области Большого Кавказского надвига [Kadirov, 2011]. Сокращение земной коры в направлении, перпендикулярном Большому Кавказскому надвигу, рассчитывается по разности скоростей в двух GPS-точках. Разность GPS-скоростей в пунктах Сиазань (SIYE) на севере Абшеронского полуострова и Хызы (XIZA) указывает на сокращение земной коры со

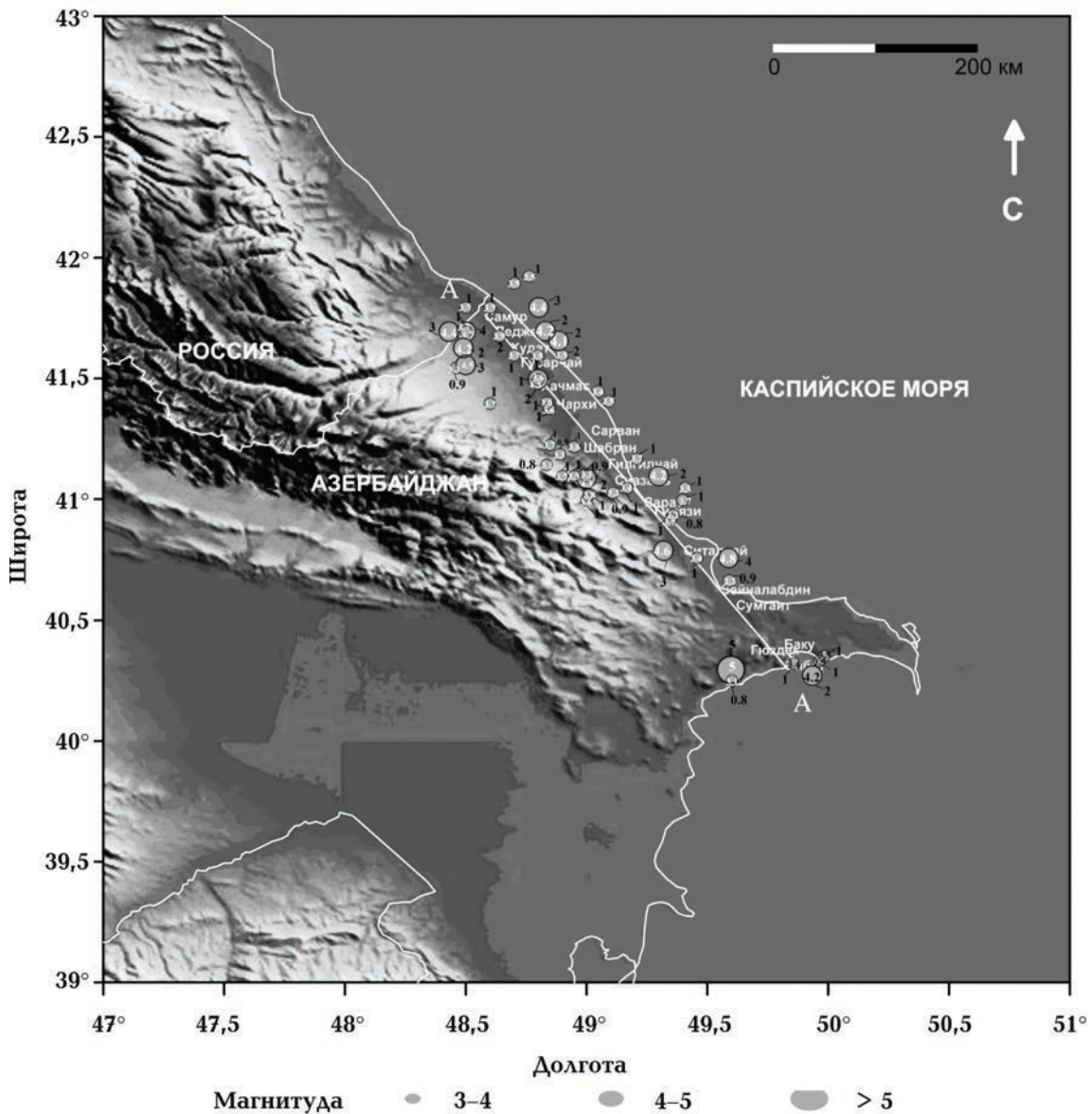


Рис. 7. Распределение эпицентров землетрясений с магнитудами $3 \leq M \leq 5$ на расстоянии менее 20 км от профиля Самур—Баку за период 1963—2015 гг. Условные обозначения см. на рис. 6.

скоростью 2,7 мм/год по ширине профиля Самур—Баку.

На карте распределения GPS-скоростей (см. рис. 4) зоны с высокой аккумуляцией напряжений проявляют себя в виде постоянного снижения значений GPS-скоростей. Одна из таких зон наблюдается по профилю Самур—Баку. Здесь, начиная от южной части профиля (от Баку (BAKI) до Самура (XIZA, SIYE, SAMU)), значения скорости горизонтальных движений постепенно уменьшаются.

Компоненты вектора скоростей горизонтальных движений (направление на север (V_N) и восток (V_E)), рассчитанные по GPS-измерениям, и рельеф вдоль профиля Самур—Баку, показаны на рис. 5. По северной компоненте видно, что доминируют пункты Самур, Хызы и Баку. В восточной компоненте наибольшее значение имеет пункт Баку. В этих точках также наблюдается подъем рельефа. Такие изменения скорости вызывают напряжение в земной коре.

Среднее значение напряжения между двумя GPS-точками вычисляется путем деления разности скоростей на расстояние между этими точками [Теркот, Шуберт, 1985]. Согласно северной компоненте, среднее значение скорости деформации, накопленной между GPS-пунктами BAKU и XIZA, составляет 16,2 nanostrain/год, между пунктами SIYE и XIZA — 112,2 nanostrain/год, между пунктами SIYE и SAMU — 28,3. С увеличением скоростей от пункта Сиазань до пункта Самур и от пункта Баку до пункта Хызы наблюдается движение в северном направлении. Согласно северной компоненте, наибольшее значение деформации, наблюдаемое между пунктами SIYE и XIZA, соответствует значительному изменению рельефа, а также расположенному здесь Сиазаньскому разлому. По восточной компоненте линейное среднее значение деформации между точками BAKU и XIZA составляет 30,2 nanostrain/год, между точками XIZA и SIYE — 7,5, между точками SIYE и SAMU — 10,7. Постоянное увеличение скоростей от пункта Самур до пункта Баку показывает, что здесь происходит движение в восточном направлении.

Согласно значениям обеих компонент скорости, скорость общей деформации между пунктами BAKU и XIZA составляет 8,9 nanostrain/год, между SIYE и XIZA — 97,5, между SIYE и SAMU — 22,3.

Зона самой большой скорости общей деформации совпадает с зоной Сиазаньского разлома, а скорость общей деформации между SIYE и SAMU совпадает с зоной Гусар-Шабранского краевого прогиба, где наблюдалась зона концентрации напряжений в кривой изменений скорости СВД и распределения гипоцентров землетрясения. Низкая скорость общей деформации совпадает с зоной Шамахино-Гобустанского синклиория. В этой зоне также наблюдается зона концентрации и напряжений (Баку), но гипоцентров землетрясений здесь отмечено мало.

Сейсмичность района. При исследовании сейсмичности Юго-Восточного Кавказа использовался каталог Республиканско-

го центра сейсмологической службы НАН Азербайджана. По данным каталога составлена карта распределения эпицентров землетрясений Юго-Восточного Кавказа и сопредельных территорий с магнитудами $4,5 \leq M \leq 6,6$ за период 1963—2015 гг. (рис. 6).

Если очаг землетрясения перед его возникновением (в зависимости от магнитуды M) аппроксимировать шаром, то его радиус (R_{\max}), который охватывает зону максимальных тектонических напряжений, определяется следующей формулой [Добровольский, 2009]:

$$R_{\max} = 10^{0,413M - 1,396}$$

Например, если произойдет землетрясение магнитудой $M=6,6$, то радиус шара, охватывающего зону максимальных тектонических напряжений в период подготовки землетрясения, составит менее 21 км. Это должно найти свое отражение на геодинамических характеристиках профиля.

На рис. 6 видно, что рядом с профилем произошло пять землетрясений с магнитудой $4,6 \leq M \leq 5,0$. Радиус максимальных тектонических напряжений изменяется от 3,1 до 4,7 км.

На рис. 7 показано распределение эпицентров землетрясений на расстоянии менее 20 км от профиля Самур—Баку с магнитудами $3 \leq M \leq 5$, произошедших в 1963—2015 гг. Радиус максимальных тектонических напряжений этих землетрясений изменяется в интервале от 0,8 до 4,7 км. Эпицентры расположены в непосредственной близости от зон концентрации напряжений, выделенных по кривой скорости СВД (Худат, Чархи, Сиазань и Баку).

Произошедшее в Каспийском море сильное землетрясение (25.11.2000 г., $M=6,2$) и его афтершоки являются, возможно, реакцией на продолжающиеся деформационные процессы и связанные с ними накопления напряжений в области Абшеронского п-ова и Среднего Каспия. Тенденция горизонтальных движений, происходящих на территории Азербайджана, предопределяет активизацию сейс-

мических процессов в зонах накопления упругих напряжений и сопредельных областях.

Заключение. Методом подбора составлена 2D гравитационная модель строения земной коры и верхней мантии по профилю Самур—Баку. Уточнена глубина поверхности верхнего и нижнего слоев кристаллической коры.

С использованием скоростей современных вертикальных и горизонтальных движений земной коры по профилю определены зоны накоплений напряжения (Худат, Чархи, Сиазань и Баку).

Наибольшее значение общей скорости деформации при использовании обеих компонент (97 nanostrain/год) фиксируется между пунктами SIYE и XIZA. Установлено, что зона самой большой скорости общей деформации совпадает с зоной Сиазань-

ского разлома. Зона Гусар-Шабранского краевого прогиба характеризуется скоростью 22,3 nanostrain/год, зона Шамахино-Гобустанского синклинория, где по кривой изменений скорости СВД наблюдается зона концентрации напряжений в земной коре, — скоростью 8,9 nanostrain/год. Эти зоны концентрации напряжений в гравитационной модели совпадают с выступами по поверхности верхнего и нижнего слоев консолидированной коры и отмечаются гипоцентрами землетрясений.

Определены радиусы очага и значение магнитуды ощутимых землетрясений, которые могут влиять на геодинамические условия в районе профиля Самур—Баку.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда развития науки при Президенте Азербайджанской Республики (грант № ЕЭФ-КЕТPL-2015-1(25)-56/27/2).

Список литературы

- Абдуллаев Р. А., Джафаров Х. Д. Геолого-геофизическая характеристика Прикаспийского нефтеносного района Азербайджана. Баку: Азернешр, 1962. 168 с.
- Амирасланов Т. С. Интерпретация гравитационных аномалий сложнопостроенных нефтегазоносных областей на основе комплексного анализа геофизических полей (на примере Азербайджана и прилегающей акватории): Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Баку, 1986.
- Ахмедбейли Ф. С., Мамедов А. В, Ширинов Н. Ш., Шихалибейли Э. Ш. Неотектоническая карта Азербайджана. Масштаб 1:500000. Аэрогеодезия, 1991.
- Ахмедбейли Ф. С., Исаева М. И., Кадиров Ф. А., Коробанов В. В. Геодинамика неотектонического этапа Кавказского сегмента Альпийско-Гималайского орогенного пояса. Баку: Нафта-пресс, 2010. 214 с.
- Андреев Б. А., Клушин И. Г. Геологическое истолкование гравитационных аномалий. Ленинград: Недра, 1965. 496 с.
- Буллах Е. Г. Обзор работ по методам минимизации в обратных задачах гравиметрии и магнитометрии. *Геофиз. журн.* 1999. Т. 21. № 4. С. 5—19.
- Буллах Е. Г. Прямые и обратные задачи гравиметрии и магнитометрии. Математические методы геологической интерпретации гравиметрических и магнитометрических данных. Киев: Наук. думка, 2010. 464 с.
- Буллах Е. Г., Маркова М. Н. Решение обратных задач гравиметрии методом подбора. *Геофиз. журн.* 1992. Т. 14. № 4. С. 9—19.
- Буллах Е. Г., Маркова М. Н., Тимошенко В. И., Бойко П. Д. Математическое обеспечение автоматизированной системы интерпретации гравитационных аномалий. Киев: Наук. думка, 1984. 112 с.
- Бабаев Д. Х., Гаджиев А. Н. Глубинное строение и перспективы нефтегазоносности бассейна Каспийского моря. Баку: Трест «Каспморнефтегеофизразведка» ГНКАР, 2006. 297 с.
- Геофизические исследования в Азербайджане. Гл. ред. А. М. Зейналов. Баку: Шарг-Гарб, 1996. 400 с.
- Геология Азербайджана. Т. IV. Тектоника. Гл. ред. В. Е. Хаин, Ак. А. Ализаде. Баку: Нафта-пресс, 2005, 506 с.

- Гаджиев Р. М. Глубинное геологическое строение Азербайджана. Баку: Азернешр, 1965, 200 с.
- Гаджиев Р. М., Кадилов Ф. А., Кадыров А. Г., Кунстман В. В. Выявление скрытых периодичностей в современном вертикальном движении земной коры на профиле Улан Хол—Баку—Астара. *Изв. АН Азербайджанской ССР, Сер. наук о Земле*. 1987. № 1. С. 57—62.
- Добровольский И. П., Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. Москва: Физматлит, 2009. 240 с.
- Деменицкая Р. М. Кора и мантия Земли. Москва: Недра, 1967. 278 с.
- Егоров А. С. Глубинное строение и геодинамика литосферы Северной Евразии (по результатам геолого-геофизического моделирования вдоль геотравверсов России). Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 200 с.
- Ермаков А. П., Лыгин И. В. Особенности совместного сейсмического и гравитационного моделирования вдоль профилей глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). *Российский геофизический журнал*. 2006. № 43-44. С. 17—23.
- Кадилов Ф. А. Гравитационное поле и модели глубинного строения Азербайджана. Баку: Нафта-пресс, 2000. 112 с.
- Кадилов Ф. А., Сафаров Р. Т. Деформация земной коры Азербайджана и сопредельных территорий по данным GPS-измерений. *Известия НАН Азербайджана. Науки о земле*. 2013. № 1. С. 47—55.
- Касьянова Н. А. Экологические риски и геодинамика. Москва: Научный мир, 2003. 332 с.
- Козленко М. В., Козленко Ю. В. Гравитационное моделирование литосферы центральной части Крымско-Черноморского региона. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2016. № 3. С. 5—17.
- Козленко М. В., Козленко Ю. В., Строение и развитие восточной части северо-западного шельфа Черного моря (по результатам интерпретации геофизических данных вдоль профиля II КМПВ). *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 4. С. 63—74.
- Краснопевцева Г. В. Глубинное строение Кавказа. В кн.: *Строение земной коры и верхней мантии Центральной и Восточной Европы*. Киев: Наук. думка, 1978. С. 190—199.
- Лилиенберг Д. А. Опыт комплексного картирования современной геодинамики (на примере Азербайджанской ССР). В кн.: *Современные движения земной коры. Теория, методы, прогноз. Результаты исследований по международным геофизическим проектам*. Москва: Наука, 1980. С. 65—76.
- Отчет «Результаты комплексных геолого-геофизических исследований, проведенных в 2014—2017 гг. с целью изучения глубинного геолого-тектонического строения Гусар-Шабранской сейсмоактивной зоны». Фонды Министерства экологии и природных ресурсов Азербайджана. Баку, 2018, 130 с.
- Павленкова Н. И., Егорова Т. П., Старостенко В. И., Козленко В. Г. Трехмерная плотностная модель литосферы Европы. I. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1991. № 4. С. 3—13.
- Пучков В. Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Гилем, 2000. 146 с.
- Рязанцев П. А., Кошелева Н. В. Плотностное 2D моделирование палеопротерозойской Южно-Онежской мульды. *Труды Карельского научного центра РАН*. 2017. № 2. С. 86—95.
- Сафаров И. Б. Петрофизические модели литосферных плит материков и океанов. Баку: Элм, 2011. 306 с.
- Старостенко В. И., Куприенко П. Я., Макаренко И. Б., Легостаева О. В. Плотностная модель земной коры вдоль профиля DOBRE. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 1. С. 28—41.
- Старостенко В. И., Пашкевич И. К., Макаренко И. Б., Куприенко П. Я., Савченко А. С. Геодинамическая интерпретация геолого-геофизической неоднородности литосферы Днепровско-Донецкой впадины. *Доп. НАН України*. 2017. № 9. С. 84—94. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.09.084>.
- Теркот Д., Шуберт Д. Ж. Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред. Т. 2. Москва: Мир, 1985. 360 с.
- Физические свойства осадочного покрова территории СССР: Справочник. Под ред. М. Л. Озерской, Н. В. Подобы. Москва: Недра, 1967. 772 с.

- Хаин В. Е. Западно-Сибирская молодая плита (мегасинеклиза). В кн.: *Региональная геотектоника. Внеальпийская Азия и Австралия*. Москва: Недра, 1979. С. 55—68.
- Хаин В. Е., Ахмедбейли Ф. С. Геологическое строение и развитие Кусаро-Дивичинского синклиория. В кн.: *Материалы по геологии Северо-Восточного Азербайджана*. Баку: Изд. АН Азерб. ССР, 1957. С. 183—385.
- Шенгеля Г. Ш. Гравитационная модель земной коры Кавказа. Москва: Наука, 1978. 128 с.
- Яценко В. Р. Геодезические исследования вертикальных движений земной коры. Москва: Недра, 1989. 192 с.
- Яценко В. Р. Современные вертикальные движения Западного Прикаспия по данным повторного нивелирования. *Геодезия и картография*. 1974. № 2. С. 24—25.
- Ali-Zade, A. A., Agabekov, M. G., Shekinskiy, E. M., & Shikhalibeyli, E. Sh., (1982). Tectonic map of Azerbaijan. Leningrad: The Ministry of geology of the USSR.
- Jackson, J., (1992). Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern Turkey and the Caucasus. *Journal of Geophysical Research*, 97(B9), 12471—12479. <https://doi.org/10.1029/92JB00944>.
- Kadirov, F. A., (2004). Gravity model of lithosphere in the Caucasus-Caspian Region, (in) South Caspian Basin. In *Geology, geophysics, oil and gas content* (pp. 107—123). Baku: Nafta Press.
- Kadirov, F. A., (2011). Report on scientific-research work on «Modern geodynamics of Azerbaijan and seismic hazard (based on GPS, seismic and geophysical data)». Foundation of the Institute of Geology and Geophysics of ANAS.
- Kadirov, F. A., & Gadirov, A. H., (2014). A gravity model of the deep structure of South Caspian Basin along submeridional profile Alborz—Absheron Sill. *Global and Planetary Change*, 114, 66—74. doi:10.1016/j.gloplacha.2013.09.001.
- Kadirov, F., Floyd, M., Alizadeh, A., Guliev, I., Reilinger, R., Kuleli, S., King, R., & Toksoz, M. N., (2012). Kinematics of the eastern Caucasus near Baku, Azerbaijan. *Natural Hazards*, 63(2), 997—1006. doi:10.1007/s11069-012-0199-0.
- Kadirov, F. A., Floyd, M., Reilinger, R., Alizadeh, 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 Azerbaijan National Academy of Sciences, The Sciences of Earth*, (3), 3—17.
- Kadirov, F., Mammadov, S., Reilinger, R., McClusky, S., (2008). Global Positioning System measurements of tectonic deformation in Azerbaijan. In *New constraints on active faulting and earthquake hazards* (pp. 82—88). The Sciences of the Earth. Proc. Azerb. Nat. Acad. Sci.
- McKenzie, D. P., (1972). Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 30(2), 109—185. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb02351.x>
- Masson, F., Van Gorp, S., Chery, J., Djamour, Y., Tatar, M., Tavakoli, F., Nankali, H., & Vernant, P., (2006). Extension in NW Iran Driven by the Motion of the South Caspian Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(1-2), 180—188. doi: 10.1016/j.epsl.2006.09.038.
- Nilforoushan, F., Masson, F., Vernant, P., Vigny, C., Martinod, J., Abbassi, ... Chéry, J., (2003). GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran. *Journal of Geodesy*, 77(7-8), 411—422. doi: 10.1007/s00190-003-0326-5.
- Pitarka, A., Gok, R., Yetirmishli, G., Ismayilova, S., & Mellors, R., (2016). Ground Motion Modeling in the Eastern Caucasus. *Pure and Applied Geophysics*, 173(8), 2791—2801. doi: 10.1007/s00024-016-1311-2.
- Philip, H., Cisternas, A., Gviskiani, A., & Gorshkov, A., (1989). The Caucasus: An actual example of the initial stages of continental collision. *Tectonophysics*, 161(1-2), 1—21. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90297-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90297-7).
- Reilinger, R. S., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., ... Karam, G., (2006). 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*, 111, B05411. doi:10.1029/2005JB004051.
- 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 K. T. Biddle, & N. Christie-Blick (Eds.), *Strike-slip Faulting and Basin Formation* (pp. 227—264). Society of Econ. Paleont. Min. Sec. Pub.

Deep structure and geodynamic peculiarities of the earth crust of the western coast of the Caspian sea

A. G. Kadyrov, G. R. Sadigova, S. T. Agayeva, 2018

The article presents 2D gravity model of the geodynamic profile of Samur—Baku, located on the western coast of the Caspian Sea and the geodynamic characteristics of the earth crust in the profile region are studied. 2D gravity model is made by the matching method of density boundaries. The boundaries of the lower layer of crust (28—32 km) and the Moho surface (47—57 km) are specified. Along the profile, the velocity curves of modern vertical and horizontal motions are analyzed. On the curve of velocities of modern vertical motions on the boundary of the rise and fall of the earth's crust, places of stress accumulation zones along the profile were identified. Modern vertical motions of the earth's crust show that along the profile the main stress accumulation zones are located in the immediate vicinity of the points Khudat, Charkhi, Siazan and Baku. The average deformation velocity between two GPS points was calculated by dividing the velocities difference to the distance between these points. It is established that the zone of the highest deformation velocity (97,5 nanostrain/year) coincides with the zone of the Siazan fault, the zone of the Gusar-Shabran edge trough is characterized by a velocity of 22,3 nanostrain/year. The low deformation velocity (8,9 nanostrain/year) coincides with the zone of the Shamakhi-Gobustan synclinorium. These zones of stress accumulation in the gravity model coincide with the protrusions along the surface of the upper and lower layers of the consolidated crust and marked by hypocenters of earthquakes. The values of the radii of foci of earthquakes that create additional perceptible stresses that affect the geodynamic conditions of the earth crust in the profile region are determined.

Key words: South-Eastern Caucasus, gravity model, epicenter, earthquake, fault, GPS velocities, stress.

References

- Abdullaev, R. A., & Dzhafarov, Kh. D., (1962). *Geological and geophysical characteristics of the Caspian oil-bearing region of Azerbaijan*. Baku: Azerneshr (in Russian).
- Amiraslanov, T. S. (1986). Interpretation of gravitational anomalies of complex oil and gas regions on the basis of complex analysis of geophysical fields (on the example of Azerbaijan and the adjacent water area). *Extended abstract of Doctors thesis*. Baku (in Russian).
- Akhmedbeyli, F. S., Mamedov, A. V., Shirinov, N. Sh., & Shihalibeyli, E. Sh. (1991). *Neotectonic map of Azerbaijan*. Scale 1:500 000. Aerogeodesy (in Russian).
- Akhmedbeyli, F. S., Isayeva, M. I., Kadirov, F. A., & Korobanov, V. V., (2010). *Geodynamics of the neotectonic stage of the Caucasian segment of the Alpine-Himalayan orogenic belt*. Baku: Nafta-press (in Russian).
- Andreev, B. A., & Klushin, I. G., (1965). *Geological interpretation of gravity anomalies*. Leningrad: Nedra (in Russian).
- Bulakh, Ye. G., (1999). Review of works on methods of minimization in inverse problems of gravimetry and magnetometry. *Geofizicheskiy zhurnal*, 21, (4), 5—19 (in Russian).
- Bulakh, Ye. G., (2010). *Direct and inverse gravimetry and magnetometry. Mathematical methods of geological interpretation of gravimetric and magnetometric data*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Bulakh, Ye. G., & Markova, M. N., (1992). Solution of inverse problems of gravimetry by the selection method. *Geofizicheskiy zhurnal*, 14, (4), 9—19 (in Russian).
- Bulakh, Ye. G., Markova, M. N., Timoshenko, V. I., & Boyko, P. D., (1984). *Mathematical Support of the Automated System for the Interpretation*

- of *Gravitational Anomalies*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Babaev, D. Kh., & Gadzhiev, A. N., (2006). *Deep structure and prospects of oil and gas potential of the Caspian Sea basin*. Baku: Trust «Caspomorneftegeofizvedka» (in Russian).
- Zeynalov, A. M. (Ed.). (1996). *Geophysical research in Azerbaijan*. Baku: Sharg-Garb (in Russian).
- Khain, V. E., Alizade, Ak. A. (Eds.). (2005). *Geology of Azerbaijan, Vol. IV. Tectonics*. Baku: Nafta Press (in Russian).
- Gadzhiev, R. M. (1965). Deep geological structure of Azerbaijan. Baku: Azerneshr, 1965 (in Russian).
- Gadzhiev, R. M., Kadirov, F. A., Kadyrov, A. G., & Kunstman, V. V., (1987). Detection of hidden periodicities in the modern vertical movement of the Earth's crust on the profile of Ulan Hol—Baku—Astara. *Izvestiya Akademii Nauk Azerbaydzhanskoy SSR, Seriya Nauk o Zemle*, (1), 57—62 (in Russian).
- Dobrovolsky, I. P., (2009). *Mathematical theory of preparation and forecast of a tectonic earthquake*. Moscow: Fizmatlit (in Russian).
- Demenitskaya, R. M., (1967). Bark and mantle of the Earth. Moscow: Nedra (in Russian).
- Egorov, A. S., (2004). *Deep structure and geodynamics of the lithosphere of Northern Eurasia (based on the results of geological and geophysical modeling along geotraverses in Russia)*. St. Petersburg: Publishing house VSEGEI (in Russian).
- Ermakov, A. P., & Lygin, I. V., (2006). Features of joint seismic and gravity modeling along the depth seismic sounding (DGS) profiles. *Rossiyskiy geofizicheskiy zhurnal*, (43-44), 17—23 (in Russian).
- Kadirov, F. A., (2000). *Gravitational field and models of the deep structure of Azerbaijan*. Baku: Nafta Press (in Russian).
- Kadirov, F. A., & Safarov, R. T., (2013). Crustal deformation of the Azerbaijan Earth's and surrounding territories derived from GPS measurements. *Izvestiya NAN Azerbaydzhana. Nauki o zemle*, (1), 47—55 (in Russian).
- Kasyanova, N. A., (2003). *Ecological risks and geodynamics*. Moscow: Nauchnyy Mir (in Russian).
- Kozlenko, M. V., & Kozlenko, Yu. V., (2016). Gravitational modeling of the lithosphere of the central part of the Crimean-Black Sea region. *Geologiya i poleznyye iskopayemye Mirovogo okeana*, (3), 5—17 (in Russian).
- Kozlenko, M. V., & Kozlenko, Yu. V., (2013). Structure and development of the eastern part of northwestern shelf of the Black Sea (according to the results of geophysical data interpretation along II profile of CMRW). *Geofizicheskiy zhurnal*, 35(4), 63—74. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i4.2013.111420> (in Russian).
- Krasnopevtseva, G. V., (1978). Deep structure of the Caucasus. In *The structure of the earth's crust and upper mantle of Central and Eastern Europe* (pp. 190—199). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Lilienberg, 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. Results of studies on international geophysical projects* (pp. 65—76). Moscow: Nauka (in Russian).
- The report «Results of complex geological and geophysical studies conducted in 2014—2017 with the aim of studying the deep geological-tectonic structure of the Gusar-Shabran seismically active zone», (2018). Funds of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Azerbaijan. Baku (in Russian).
- Pavlenkova, N. I., Yegorova, T. P., Starostenko, V. I., & Kozlenko, V. G., (1991). Three-dimensional density model of the lithosphere of Europe. I. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*, (4), 3—13 (in Russian).
- Puchkov, V. N., (2000). *Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals*. Ufa: Gilem (in Russian).
- Ryazantsev, P. A., & Kosheleva, N. V., (2017). Density 2D modeling of the Paleoproterozoic South Onega trough. *Proceedings of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences*, (2), 86—95 (in Russian).
- Safarov, I. B., (2011). *Petrophysical models of lithospheric plates of continents and oceans*. Baku: Elm (in Russian).
- Starostenko, V. I., Kuprienko, P. Ya., Makaren-

- ko, I. B., & Legostaeva, O. V., (2008). Density model of the Earth's crust along the DOBRE profile. *Geofizicheskiy zhurnal*, 30(1), 28—41 (in Russian).
- Starostenko, V. I., Pashkevich, I. K., Makarenko, I. B., Kuprienko, P. Ya., & Savchenko, A. S., (2017). Geodynamical interpretation of the geological and geophysical heterogeneity of the Dnieper-Donets basin lithosphere. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, (9), 84—94 (in Russian).
- Terkot, D., & Schubert, D. Zh. (1985). *Geodynamics: Geological Applications of Continuum Physics*. Vol. 2. Moscow: The World (in Russian).
- Ozerskaya, M. L., & Podoba, N. V. (Eds.). (1967). *Physical properties of the sedimentary cover of the USSR: Handbook*. Moscow: Nedra (in Russian).
- Khain, V. E., (1979). West-Siberian young plate (megasinekliza). In *Regional geotectonics. Extralpine Asia and Australia* (pp. 55—68). Moscow: Nedra (in Russian).
- Khain, V. E., & Ahmedbeyli, F. S., (1957). Geological structure and development of the Kusarodivichinsky sinklinoriya. In *Materials on the Geology of North-Eastern Azerbaijan* (pp. 183—385). Baku: Publ. AS Azer. SSR (in Russian).
- Shengelaya, G. Sh., (1978). *Gravitational model of the Earth's crust of the Caucasus*. Moscow: Nauka (in Russian).
- Yashchenko, V. R., (1989). *Geodesic investigations of vertical movements of the Earth's crust*. Moscow: Nedra (in Russian).
- Yashchenko, V. R., (1974). Modern vertical movements of the Western Caspian region according to the data of repeated leveling. *Geodeziya i kartografiya*, (2), 24—25 (in Russian).
- Ali-Zade, A. A., Agabekov, M. G., Shekinskiy, E. M., & Shikhalibeyli, E. Sh., (1982). Tectonic map of Azerbaijan. Leningrad: The Ministry of geology of the USSR.
- Jackson, J., (1992). Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern Turkey and the Caucasus. *Journal of Geophysical Research*, 97(B9), 12471—12479. <https://doi.org/10.1029/92JB00944>.
- Kadirov, F. A., (2004). Gravity model of lithosphere in the Caucasus-Caspian Region, (in) South Caspian Basin. In *Geology, geophysics, oil and gas content* (pp. 107—123). Baku: Nafta Press.
- Kadirov, F. A., (2011). Report on scientific-research work on «Modern geodynamics of Azerbaijan and seismic hazard (based on GPS, seismic and geophysical data)». Foundation of the Institute of Geology and Geophysics of ANAS.
- Kadirov, F. A., & Gadirov, A. H., (2014). A gravity model of the deep structure of South Caspian Basin along submeridional profile Alborz—Absheron Sill. *Global and Planetary Change*, 114, 66—74. doi:10.1016/j.gloplacha.2013.09.001.
- Kadirov, F., Floyd, M., Alizadeh, A., Guliev, I., Reilinger, R., Kuleli, S., King, R., & Toksoz, M. N., (2012). Kinematics of the eastern Caucasus near Baku, Azerbaijan. *Natural Hazards*, 63(2), 997—1006. doi:10.1007/s11069-012-0199-0.
- Kadirov, F. A., Floyd, M., Reilinger, R., Alizadeh, Ak. 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 Azerbaijan National Academy of Sciences, The Sciences of Earth*, (3), 3—17.
- Kadirov, F., Mammadov, S., Reilinger, R., McClusky, S., (2008). Global Positioning System measurements of tectonic deformation in Azerbaijan. In *New constraints on active faulting and earthquake hazards* (pp. 82—88). The Sciences of the Earth. Proc. Azerb. Nat. Acad. Sci.
- McKenzie, D. P., (1972). Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 30(2), 109—185. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb02351.x>
- Masson, F., Van Gorp, S., Chery, J., Djamour, Y., Tatar, M., Tavakoli, F., Nankali, H., & Vernant, P., (2006). Extension in NW Iran Driven by the Motion of the South Caspian Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(1-2), 180—188. doi: 10.1016/j.epsl.2006.09.038.
- Nilforoushan, F., Masson, F., Vernant, P., Vigny, C., Martinod, J., Abbassi, ... Chéry, J., (2003). GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran. *Journal of Geodesy*, 77(7-8), 411—422. doi: 10.1007/s00190-003-0326-5.
- Pitarka, A., Gok, R., Yetirmishli, G., Ismayilova, S., & Mellors, R., (2016). Ground Motion Modeling in the Eastern Caucasus. *Pure and Applied Geophysics*, 173(8), 2791—2801. doi: 10.1007/s00024-016-1311-2.

- Philip, H., Cisternas, A., Gviskiani, A., & Gorshkov, A., (1989). The Caucasus: An actual example of the initial stages of continental collision. *Tectonophysics*, 161(1-2), 1—21. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90297-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90297-7).
- Reilinger, R. S., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S. Cakmak, R., ... Karam, G., (2006). 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*, 111, B05411. doi:10.1029/2005JB004051.
- 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 K. T. Biddle, & N. Christie-Blick (Eds.), *Strike-slip Faulting and Basin Formation* (pp. 227—264). Society of Econ. Paleont. Min. Sec. Pub.