

УДК 550.34

Л.В. Панина¹, В.А. Зайцев², А.О. Агибалов³, Е.А. Мануилова⁴, Г.П. Бардышев⁵

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ НОВЕЙШЕЙ ГЕОДИНАМИКИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО И ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1
ФГБУН «Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН», 123242, Москва, Большая Грузинская ул., 10, стр. 1*

*Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1
Schmidt Earth Physics Institute RAS, 123242, Moscow, Bol'shaya Gruzinskaya str., 10–1, bd 1*

Структурно-геоморфологический и морфометрический анализ Северо-Западного и Центрального Кавказа (до меридиана г. Эльбрус) и прилегающих территорий предгорных впадин и Черноморского бассейна, дополненный компьютерной статистической обработкой полевых замеров трещиноватости, позволил выявить продольную и поперечную зональность новейших дислокаций, как правило, унаследованную от древних этапов развития. Неотектонической зональности подчинено распределение землетрясений. Установлено, что трещиноватость разновозрастных горных пород определяет ориентировку современной эрозионной сети, а линии ее вытянутости, построенные с помощью программы LESSA, коррелируют с полем тектонических напряжений. Морфометрический анализ показал высокую степень статистической корреляции между плотностью землетрясений и величиной вертикального расчленения рельефа, скоростью современных вертикальных движений, что позволяет рекомендовать эти параметры для прогноза сейсмичности.

Ключевые слова: неотектоника, структурно-геоморфологический анализ, морфометрический анализ, разрывы, трещиноватость, сейсмичность.

Structural-geomorphological and morphometric analyses of the North-West and Central Caucasus (to the meridian of Elbrus) and adjacent areas of the foothills and the Black Sea basin, supplemented by computer statistical processing of field fracturing measurements, revealed the longitudinal and transverse zonal of the latest dislocations, which is inherited from ancient stages of development. The distribution of earthquakes is subordinate to the neotectonic zonal. It has been established that the cracking of different age rocks determines the orientation of the modern erosion network, and the lines of its elongation, built with the help of the LESSA program, correlate with the field of tectonic stresses. Morphometric analysis showed a high degree of statistical correlation between the density of earthquakes and the magnitude of the vertical dissection of the relief, the speed of modern vertical movements, which makes it possible to recommend these parameters for forecasting seismicity.

Key words: neotectonics, structure and geomorphologic analysis, morphometric analysis, faults, jointing, seismicity.

Введение. Изучением новейшей тектоники и сейсмичности Северо-Западного и Центрального Кавказа занимались многие исследователи. Наиболее известны работы В.Е. Хaina, М.В. Муратова (1962), Е.Е. Милановского (1968), Л.П. Полканова (1971), Н.И. Николаева (1979), А.И. Летавина и В.М. Перервы (1987), С.А. Несмеянова (1992, 1999) и др. В задачи наших исследований входило выявление новейших дислокаций и установление их взаимосвязи с сейсмическими событиями с использованием геоморфологических методов в комплексе с современными методиками компью-

терной обработки полученных данных, включая анализ трещиноватости разновозрастных пород.

Материалы и методы исследований. Работа была направлена на выявление взаимосвязей новейших дислокаций с характером трещиноватости разновозрастных горных пород и сейсмичностью. Выполнен комплекс исследований, включавший структурно-геоморфологическое дешифрирование топографических карт и космических снимков в масштабе 1:1 000 000, 1:500 000, а для отдельных районов и детальнее; морфометрический анализ на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) ASTER

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, доцент, канд. геол.-минер. н.; e-mail: panina53@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, вед. науч. с., канд. геол.- минер. н.; e-mail: v.zaitsev@mail.ru

³ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, ст. науч. с.; e-mail: agibalo@yandex.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, аспирант; e-mail: manuilovaekaterina139@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, студент; e-mail: grbard@yandex.ru

GDEM; построение карт базисных поверхностей для речных долин разного порядка; статистический анализ сейсмических событий. Также выполнены полевые замеры трещиноватости и борозд скольжения на территории Центрального и Северо-Западного Кавказа (от района Минеральных Вод до окрестностей пос. Джубга). Полевой фактический материал (трещины и борозды скольжения) обрабатывался на компьютере с использованием программы STEREONET, что позволило представить розы-диаграммы трещиноватости и определить ориентировку полей напряжений по бороздам скольжения. Кроме того, выполнен компьютерный анализ эрозионной сети с применением программы LESSA, в результате чего построены такие важные характеристики рельефа, как линии вытянутости, розы-диаграммы речной сети, перпендикулярные к линиям вытянутости направления. С этими характеристиками сопоставляли розы-диаграммы замеренной в поле трещиноватости пород. Полученные закономерности коррелировали с распределением землетрясений и новейшими дислокациями, выявленными структурно-геоморфологическим и морфометрическим методами. Работа выполнялась с использованием ГИС-технологий, позволяющих сопоставлять разного рода материалы и получать наиболее достоверную информацию о новейших дислокациях, проводить их корреляцию с геологическими, сейсмическими данными, современными горизонтальными и вертикальными движениями и другими геодинамическими характеристиками.

Результаты исследований и их обсуждение. Новейшее строение Северо-Западного и Центрального Кавказа. Горно-складчатое сооружение Большого Кавказа возникло на месте альпийских бассейнов, развивавшихся с конца палеозоя или ранней юры. Становление новейшей структуры альпийского горно-складчатого сооружения Большого Кавказа датируется поздним сарматом. С этого времени происходит активный рост Кавказского орогена, а в пред- и межгорных впадинах, испытывающих интенсивное погружение, накапливаются грубые молассовые отложения, это позднеорогенная (или конэрэзионная) стадия развития. Дальнейшее развитие орогенного процесса привело к разрастанию положительных структурных форм за счет сопредельных отрицательных и к вовлечению в поднятие структур Западно-Кубанской, Восточно-Кубанской, Терско-Каспийской предгорных впадин [Костенко, Панина, 2001]. В современном рельефе ороген Большого Кавказа выражен асимметричным сводово-глыбовым поднятием, северный склон которого на западе и востоке полого спускается в область Предкавказских прогибов, а в центральной части граничит со Ставропольским поднятием. Крутой южный склон соседствует со структурами Закавказья. Характерна поперечная и продольная зональность орогена, благодаря которой в рельефе выделяется ряд ступеней — сегмен-

тов, границами которых служат зоны разломов, как правило, выраженных в рельефе. Западной ступенью служит слабоприподнятое горное сооружение Северо-Западного Кавказа с амплитудой новейших поднятий до 2–2,5 км в своде, которая уменьшается на северо-западной периферии до 100–250 м. Центральная ступень соответствует наиболее поднятыму Центральному Кавказу, более широкому и сложнопостроенному, с максимальной амплитудой поднятий в районе исследования 5,1 км (рис. 1). Границей между ступенями служит субмеридиональная Пшехско-Адлерская зона разломов, которая, пересекая горное сооружение, продолжается в Западно-Кубанскую предгорную впадину, где служит ее восточной границей. Отдельные разрывы этой зоны достаточно хорошо дешифрируются в рельефе, совокупность их представляет новейшую шовную зону поперечного дробления со сбросовой кинематикой [Несмеянов, 2001].

Северо-Западный сегмент. Новейшая структура Северо-Западного Кавказа представляет собой систему блоковых поднятий центральной сводовой части и склонов орогена, разделенных узкими долинами. Реже, особенно на западной периферии, встречаются и пликативные поднятия (например, Новороссийское). Центральное сводовое поднятие Северо-Западного Кавказа с крутым южным и пологим северным склонами обладает уплощенной формой и характеризуется умеренными значениями (до 2,5 км) амплитуд в восточной, пограничной с Центральным Кавказом области, уменьшаясь на западе до 100 м, где это поднятие граничит с более опущенной Керченско-Таманской областью. Северный склон поднятия полого погружается в сторону Западно-Кубанской впадины, южный — кротко обрывается в Черное море. Блоковые поднятия орогена отделены одно от другого продольными (субширотными) региональными разломами — взбросами, надвигами, сбросами, выделенными ранее в работах [Несмеянов, 1992, 1999; Рогожин, Овсяченко, 2005]. К числу наиболее протяженных относятся Гайдукский, Бабичевский, Неберджавский, Северо-Шизский, Северо-Котхский сбросы. Существенное место в новейшей структуре Северо-Западного Кавказа занимают взбросово-надвиговые дислокации, установленные по данным бурения [Попков, 2007]. Наиболее ярко в виде ступени в рельефе выражен Ахтырский надвиг, по которому северный склон горного сооружения граничит с Западно-Кубанской предгорной впадиной.

По данным [Попков, 2007], Ахтырский надвиг имеет сложное строение и состоит из серии отдельных надвигов, по которым структуры Собербаш-Гунайского синклиниория Северо-Западного Кавказа переместились на север, перекрыв южный склон Западно-Кубанской предгорной впадины. Такое взаимоотношение орогенов с предгорными впадинами типично и часто встречается. Другие

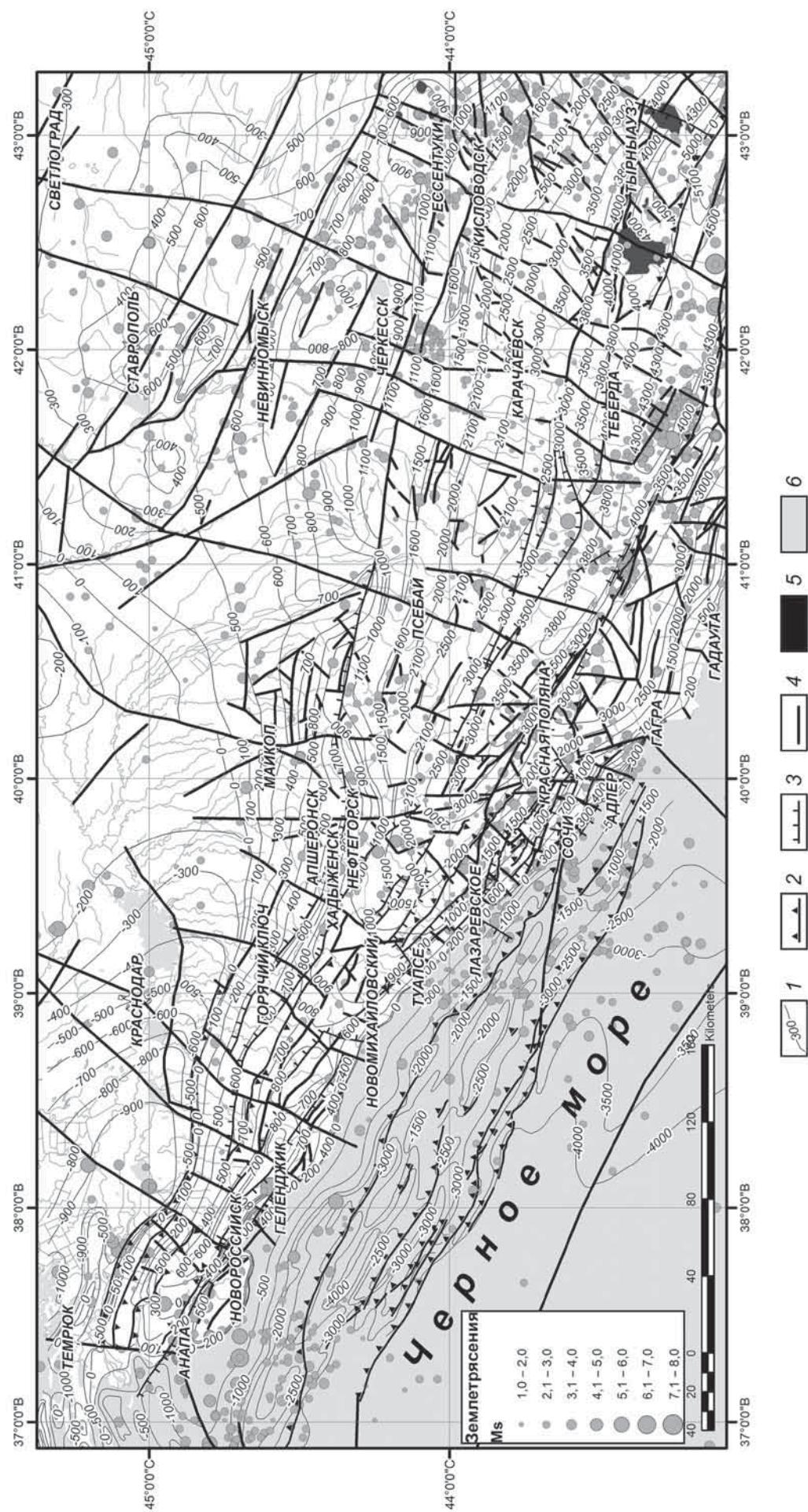


Рис. 1. Карта новейшей тектоники Северо-Западного и Центрального Кавказа:
 1 — амплитуды новейших поднятий; 2 — разрывы с неустановленной кинематикой; 3 — взвороты
 и акватории морей

исследователи трактуют эту зону сочленения как флексурно-разрывную [Несмейнов, 2001]. По геофизическим данным пограничная зона интерпретируется как вертикальный глубинный разлом. Анализ кривых тектонического прогибания территории Западно-Кубанской впадины показал, что начиная с позднего миоцена происходила ее миграция на север [Костенко, Панина, 2001]. На это указывает и смещение русла р. Кубань. Последнее обстоятельство свидетельствует, скорее, о взбросо-надвиговой природе Ахтырского разлома и перемещении структур в северном направлении. Южнее Ахтырского разлома в рельфе хорошо выражены надвиги, нарушающие структуры Псебайско-Гойтхского антиклиниория. Надвиги с северным падением сместителя прослеживаются и на южном склоне орогена на участке между Туапсе и Сочи (Воронцовский и др.). Взбросо-надвиговыми дислокациями осложнены линейные субширотные складки в погруженной части Туапсинского прогиба Черного моря. Осевые поверхности складок наклонены на север, как взбросы и надвиги, по которым структуры Туапсинского прогиба надвигаются на поднятие Шатского, где отложения залегают почти горизонтально.

Помимо субширотной для Северо-Западного Кавказа, как и для всего Большого Кавказа, характерна и поперечная зональность, обусловленная ступенчатым понижением абсолютных отметок блоков рельефа в направлении от Пшехско-Адлерской поперечной зоны разломов на востоке до меридиана Темрюк—Анапа на западе. Субмеридиональные дислокации зоны разрывов представляют собой структуры растяжения, возникшие при росте поднятий Большого Кавказа в субмеридиональном поле сжатия. Эти зоны разрывов разрабатываются речными долинами, смещают хребты, вдоль них изменяется простирание структур, они служат границами разновысотных блоков и часто маркируются эпицентрами землетрясений. Среди наиболее протяженных зон, пересекающих горное сооружение и Западно-Кубанскую впадину, отметим Усть-Кубанскую, Новороссийскую, Дивноморскую, Краснодарскую, Новомихайловскую, Туапсинскую зоны [Костенко, Панина, 2001].

Центральный сегмент. Центральная ступень Большого Кавказа расположена восточнее Пшехско-Адлерской зоны разломов. Мы рассматривали ее часть, ограниченную на востоке меридианом от г. Иноземцево (район Минеральных Вод) на севере до Чегемского вулканического массива на юге. Абсолютные отметки рельефа в центральном поднятии Кавказа резко возрастают. На построенной карте сводовая часть поднятия оконтуривается изобазой 5,1 км. Отметим, что при построении карты новейшей тектоники учитывалась денудация, поэтому отметки изобаз выше, чем на ранее опубликованной карте Е.Е. Милановского масштаба 1:1 000 000 [Милановский, 1968]. Горное соору-

жение обладает асимметрией с крутым южным и пологим северным склонами и становится шире по сравнению с западным сегментом Большого Кавказа. Этот сегмент обладает сложной структурой и соответствует кристаллическому ядру Большого Кавказа, сложенному палеозойскими метаморфическими породами и гранитными интрузивами, которые в рельфе выражены наиболее высокими горными вершинами.

В новейшем структурном плане здесь так же, как и на Северо-Западном Кавказе, проявляется продольная и поперечная тектоническая зональность, которая выражается в рельфе в виде мозаики блоков разной амплитуды. Границами этих блоков служат зоны разрывов, сбросы, взбросы, сдвиги. Наиболее протяженные из них показаны на карте (рис. 1). Эти разрывные нарушения выражены в рельфе уступами, подчеркиваются фрагментами речных долин. К числу наиболее протяженных относится Пшекиш-Тырныаузская шовная зона палеозойского заложения, фрагменты которой реанимированы в новейший этап развития. Северный и южный склоны орогена нарушены серией разрывов, часто сбросового характера. К протяженным субширотным сбросам относятся Северо-Мзыгинский, Архызский, Южно-Ацгаринский, Южно-Сибистинский, Горячеключинский, выделенные ранее [Несмейнов, 1999]. Крутой южный склон нарушен Главным Кавказским надвигом с северным падением сместителя. Ставропольское поднятие, примыкающее с севера к орогенному сооружению Центрального Кавказа, также осложнено серией разрывов запад-северо-западного простириания, параллельных структурам Кавказа. В район исследования частично попадает Армавиро-Невинномысский разрыв, продолжающийся на востоке и проходящий через район Минеральных Вод и восточнее. Севернее параллельно ему в рельфе выражен разрыв, следующий через Ставрополь и далее на восток, в область Терско-Каспийского прогиба. Оба разрыва подчеркнуты сейсмичностью.

В новейшей структуре Центрального сегмента Кавказа помимо субширотных разрывов существенную роль играют поперечные разрывные дислокации. Эти разрывы имеют субмеридиональное (север-северо-восточное) и север-северо-западное простириание и разрабатываются фрагментами речных долин Баксана, Белой, Малой и Большой Лабой, Большим Зеленчуком, Тебердой, Подкумком и др. Эти разрывы часто представляют собой сбросы со сдвиговой составляющей; начинаясь в сводовой части орогена, они прослеживаются в Восточно-Кубанскую впадину и Ставропольское поднятие. Они служат границами блоков с разными максимальными отметками рельефа и в сочетании с продольными разрывами субкавказского простириания образуют блоковую структуру Кавказа.

Помимо установленных разрывных нарушений по геоморфологическим признакам были выявлены линеаменты или слабые зоны (зоны разрывов, трещиноватости, дробления пород), которые ограничивают блоки рельефа и вписываются в новейший структурный рисунок Кавказа. Они не показаны на карте новейшей тектоники в силу мелкого масштаба рис. 1.

Морфометрический анализ рельефа. Для морфометрического анализа использована цифровая модель рельефа, на основе которой с помощью программы ArcGis были построены схемы крутизны склонов, стандартных отклонений высот рельефа, величин вертикального расчленения, разности базисных поверхностей. Эти показатели традиционно используются при выполнении морфометрических исследований, поскольку они тесно связаны с характером тектоническим движений. Для расчета глубины вертикального расчленения территории Северо-Западного и часть Центрального Кавказа были разделены на ячейки размером 10×10 км, в пределах которых определяли разность высот. Эти расчетные ячейки использованы также для вычисления стандартных отклонений высоты, служащих одним из показателей расчлененности земной поверхности. В качестве вспомогательного морфометрического параметра использованы разности базисных поверхностей речных долин разных порядков, рассчитанные по методике В.П. Философова [Философов, 1960]. По его мнению, они отражают направленность неотектонических движений, произошедших за определенный этап, длительность которого определяется временем формирования долин соответствующих порядков. В качестве показателей, характеризующих сейсмичность Северо-Западного Кавказа, нами были выбраны следующие параметры: плотность эпицентров землетрясений [Рогожин и др., 2014], скорость современных вертикальных движений и плотность разрывных нарушений, показанные на государственных геологических картах масштаба 1:200 000 [База..., 2020]. Их сопоставление с морфометрическими параметрами рельефа про-

водилось путем расчета значений коэффициента корреляции Пирсона между соответствующими поверхностями.

Морфометрический анализ рассматриваемой территории позволил выделить 8 порядков водотоков. Нами рассмотрены карты базисных и разности базисных поверхностей с 3-го по 6-й порядок. Базисные поверхности 1-, 2-, 7- и 8-го порядков были исключены из рассмотрения из-за масштаба. Общая особенность построенных карт разностей базисных поверхностей — приуроченность повышенных значений этого параметра (>400 м) к юго-восточной части Северо-Западного Кавказа, в то время как северо-западная часть находится в области более низких значений (от -120 до $+200$ м).

Анализ построенных карт крутизны склонов, стандартных отклонений высот и глубины вертикального расчленения показывает их сходство между собой. Высокие значения упомянутых параметров характеры для южной и юго-восточной частей изучаемого района, отличающихся повышенными высотными отметками. Эти области характеризуются сейсмической активностью, большими значениями скорости современных вертикальных движений и повышенными значениями плотности разрывов. Между рассчитанными нами морфометрическими параметрами и рядом показателей, характеризующих сейсмичность Северо-Западного Кавказа (плотность эпицентров землетрясений, скорость современных вертикальных движений), существует численная корреляция (таблица). Отметим, что наибольшее значение коэффициента корреляции Пирсона с сейсмичностью имеет параметр глубины вертикального расчленения (рис. 2), который достигает величины 0,76. Эти данные позволяют сделать вывод о том, что облик рельефа рассматриваемой территории в значительной степени обусловлен влиянием сейсмотектонических процессов.

Взаимосвязь новейших дислокаций с трещиноватостью разновозрастных пород. Полевые замеры трещин и борозд скольжения на территории Центрального и Северо-Западного Кавказа (от

Значения коэффициента корреляции Пирсона между морфометрическими параметрами рельефа и показателями, характеризующими сейсмичность Северо-Западного Кавказа.

Морфометрические параметры рельефа	Показатели, характеризующие сейсмичность Северо-Западного Кавказа		
	Плотность эпицентров землетрясений, км^{-1}	Скорость вертикальных движений, $\text{мм}/\text{год}$	Плотность разломов, км^{-1}
Высота рельефа, м	0,70	0,79	0,48
Крутизна склонов, град	0,74	0,72	0,67
Стандартные отклонения высот, м	0,75	0,76	0,60
Глубина вертикального расчленения, м	0,76	0,78	0,62
Разности базисных поверхностей, м:			
а) 3- и 4-го порядка	0,48	0,53	0,41
б) 4- и 5-го порядка	0,39	0,46	0,30
в) 5- и 6-го порядка	0,45	0,57	0,38

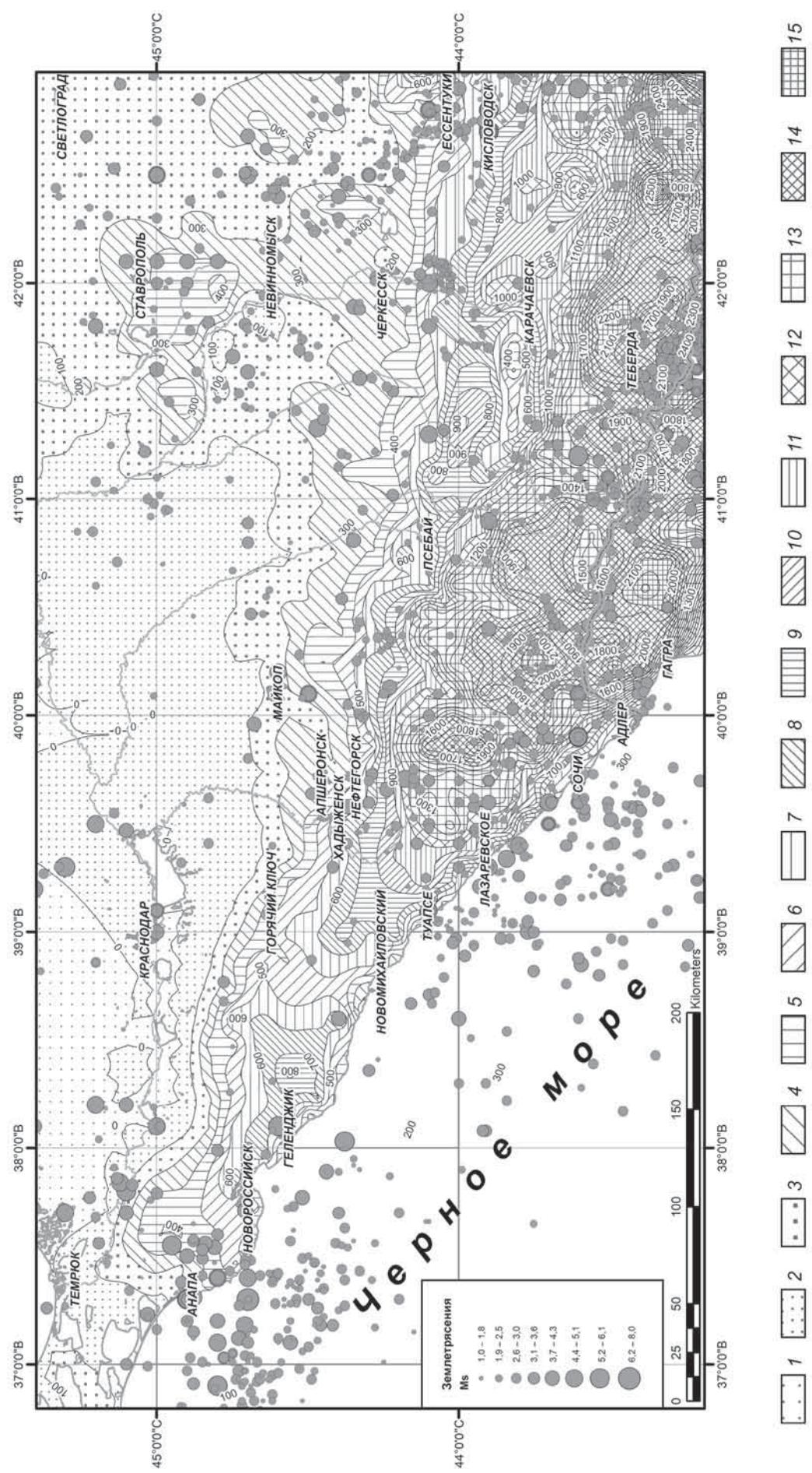


Рис. 2. Карта величин глубины вертикального вреза: глубина вертикального вреза в м: 1 — <0, 2 — 0–100, 3 — 100–200, 4 — 200–300, 5 — 300–400, 6 — 400–500, 7 — 500–600, 8 — 600–700, 9 — 700–800, 10 — 800–900, 11 — 900–1000, 12 — 1000–1100, 13 — 1100–1600, 14 — 1600–2000, 15 — 2000–2600

района Минеральных Вод до окрестностей пос. Джубга) обработаны на компьютере с использованием программы STEREONET, что позволило представить розы-диаграммы трещиноватости и определить ориентировку полей напряжений по бороздам скольжения. Кроме того, выполнен компьютерный анализ эрозионной сети с применением программы LESSA, в результате которого получены такие важные характеристики рельефа, как линии вытянутости, розы-диаграммы речной сети и направления, перпендикулярные к линиям вытянутости. С этими характеристиками сопоставлены розы-диаграммы трещиноватости пород.

Полученные данные коррелировали с распределением землетрясений и новейшими дислокациями, выявленными структурно-геоморфологическим и морфометрическим методами. Замеры проводились в разновозрастных породах и в различных структурных элементах Кавказа. Были замерены трещины в миоцен-плиоценовых вулканитах Эльбрусской области, приуроченной к Транскавказскому поперечному поднятию Кавказа в районе Пятигорска, Железноводска, Минеральных Вод, где они слагают горы Змейка, Бештау, Развалка, Машук и др. Сопоставление замеров трещиноватости с простиранием эрозионной сети с помощью программы LESSA [Златопольский, 1988] выявило зависимость между системами трещин в породах и ориентировкой речных долин (рис. 3), что позволяет использовать розы-диаграммы простирания эрозионной сети как показатель степени трещиноватости горных пород.

Согласно смещениям, выявленным по бороздам скольжения в олигоценовых отложениях на северо-восточном склоне г. Развалка, ось сжатия имеет север-северо-восточную ориентировку (рис. 3), что совпадает с субмеридиональными разрывными нарушениями, установленными по геологическим исследованиям. Это обстоятельство позволяет интерпретировать эти разрывы как структуры растяжения и объясняет появление системы север-северо-восточных трещин в магматическом массиве г. Развалка. Отметим, что субмеридиональные трещины обнаружены и в верхнемеловых мергелях г. Машук. Кроме того, здесь присутствуют северо-восточные трещины, что совпадает с простиранием разрывов, показанных на геологической карте, примечательно, что эрозионная сеть имеет такую же ориентировку. Таким образом, эти направления наследуются в новейший тектонический этап, по нему произошло внедрение интрузий в миоцене.

Эти закономерности ярче выражены в окрестностях г. Эльбрус, сложенной позднеплиоцен-голоценовыми вулканитами преимущественно кислого и среднего состава, вплоть до основных андезиобазальтов. Ранее Е.Е. Милановским [1968] было выделено несколько вулканических центров, которые контролируются зонами поперечных раз-

ломов и трещин и их пересечением. Существенную роль при этом играла Пшекиш-Тырныаузская шовная зона, выраженная в рельфе системой субширотных разрывов, разделяющих разновысотные ступени рельефа. В результате наших замеров трещиноватости в лавах на южном склоне вулкана, вблизи Поляны Азау на высоте 3010 м, возраст которых примерно 10 тыс. лет (Н.В. Короновский, устное сообщение) выявлено два направления: субмеридиональное (350°) и северо-восточное (60°). Эти направления трещиноватости устойчиво фиксируются во всех точках наблюдения независимо от типов и возраста горных пород: в палеозойских гранитах, протерозойских гнейсах и голоценовых дакитовых лавах и туфах. Выявленные простирания трещин четко коррелируют с ориентировками эрозионной сети. По замерам борозд скольжения установлено северо-восточное направление оси сжатия, причем как в голоценовых лавах, так и в протерозойских гнейсах.

Замеры трещиноватости в мезозойских и кайнозойских породах зоны грабен-синклиниория Передового хребта, обнажающихся в долинах р. Мзымта и ее притоков, выявили изменение преобладающего простирания с северо-восточного в районе курорта Эстосадок на северо-западе на участке от устья р. Чвежипсе (правый приток р. Мзымта) до Ахтырского каньона. В толще переслаивания песчаников и алевролитов раннеюрского возраста, развитых в правом и левом бортах долины р. Ачипсе (окрестности города-курорта Эстосадок), замерены трещины северо-восточного, северо-западного и субширотного простирания, что совпадает с ориентировками речной сети. Северо-западное простирание присуще и долине р. Ачипсе, которая, по-видимому, разрабатывает зону разрыва. Параллельно долине по геологическим данным также выделяется разрывное нарушение. Кроме того, долина р. Мзымта на этом участке субширотна и находится в соответствии с ориентировкой замеренных трещин. Таким образом, северо-западные и субширотные трещины вписываются в тектоническую ситуацию.

Для обнажающихся алевролитов и аргиллитов позднемелового возраста на правом борту долины р. Мзымта, в районе впадения в нее р. Чвежипсе и далее вниз по течению вблизи пос. Кепша рисунки роз-диаграмм трещин схожи. Здесь преобладают трещины северо-западного простирания, но проявляются и северо-восточные. Северо-западное простирание трещин находится в соответствии с ориентировкой долин рек Чвежипсе и Кепша, правых притоков р. Мзымта, а северо-восточное — с простиранием долины р. Мзымта. По геологическим данным здесь выделена система северо-западных разрывных нарушений, а по структурно-геоморфологическим — Мзымтинский и Кепшинский сбросы [Несмеянов, 1992]. В районе пос. Красная Скала нижне-среднекайнозойская

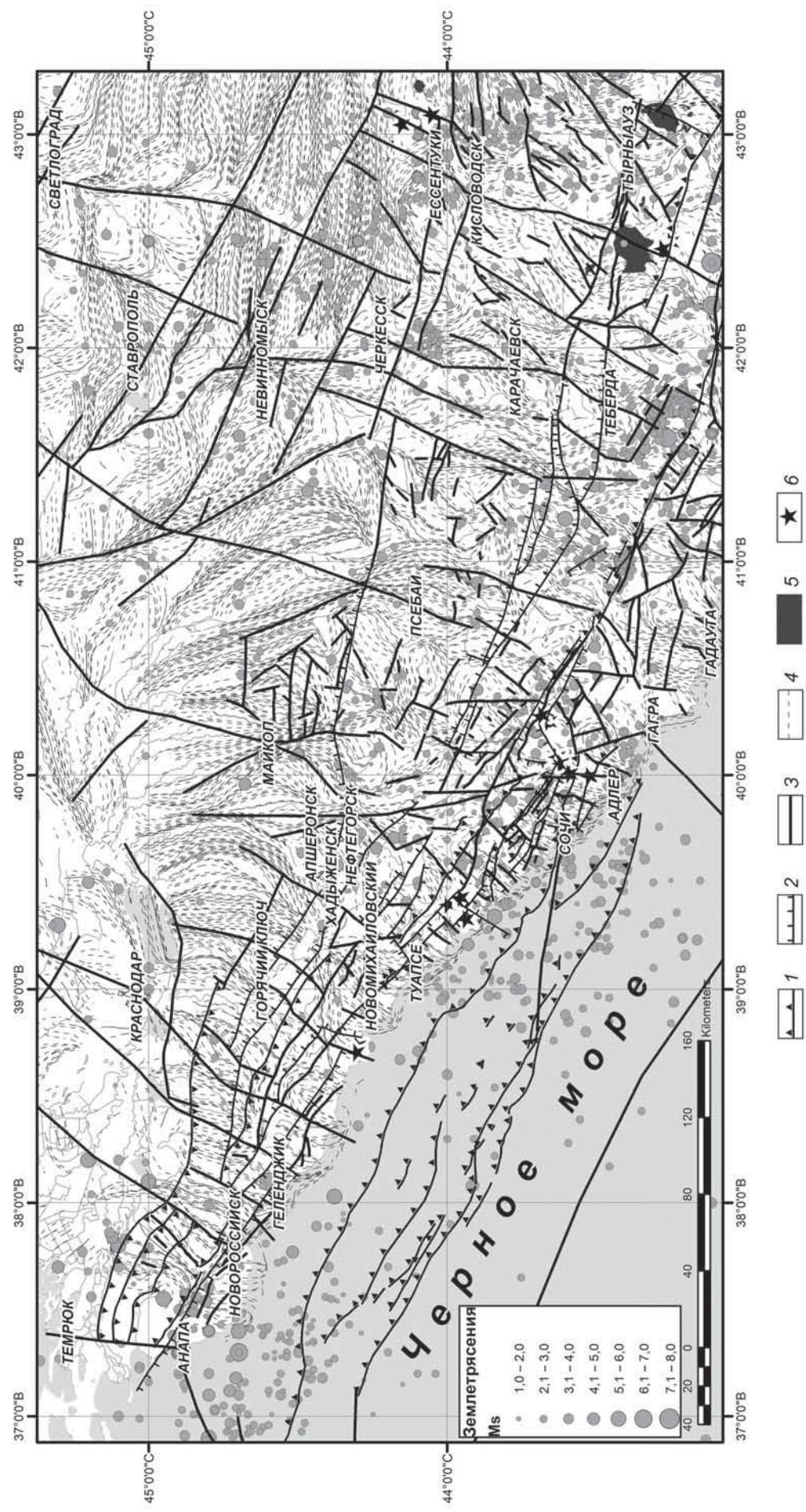


Рис. 3. Карта линий вытянутости эрозионной сети и новейших разрывных нарушений: 1 — надвиги и взбросы; 2 — сбросы; 3 — разрывы с неустановленной кинематикой; 4 — линии вытянутости эрозионной сети, 5 — вулканические и интрузивные образования; 6 — точки полевых наблюдений

толща переслаивания аргиллитов, алевролитов и песчаников, смятых в складки, нарушена трещинами и разрывами преимущественно северо-западного простирания. Здесь наблюдается система взбросов, также простирающихся в северо-западном направлении. Эти дислокации коррелируют с разрывными нарушениями, установленными геолого-геоморфологическими методами.

Результаты замеров трещиноватости в районе Ахтырского каньона (окрестности пос. Казачий Брод) в верхнемеловых мергелях указывают на северо-западное, северо-восточное и субмеридиональное простирание дислокаций. Появившиеся здесь субмеридионально ориентированные трещины согласны с простиранием долины р. Мзымта, которая разрабатывает новейший сброс. Важно отметить, что изменение ориентировки долины с северо-восточной на субмеридиональную коррелирует с розами-диаграммами трещиноватости.

Борозды скольжения также изменяют ориентировку. Так, в районе г. Эстосадок преобладают сдвиговые смещения (правой и левой кинематики), указывающие на обстановку субмеридионального сжатия. Этую же ориентировку имеют линии вытянутости, рассчитанные с помощью программы LESSA. Вниз по долине, в районе впадения р. Чвежипсе, эти линии исчезают, а борозды скольжения указывают на субвертикальное положение оси сжатия. Ниже по течению р. Мзымта борозды скольжения свидетельствуют о горизонтальном северо-восточном положении оси сжатия, что коррелирует с линиями вытянутости эрозионной сети.

В окрестностях пос. Лазаревское (Чвежипсинская покровно-складчатая зона Северо-Западного Кавказа) замеры трещиноватости проводили в меловых отложениях, обнажающихся в склонах долин рек Свирка, Аше и Псезуапсе. Трещиноватость здесь имеет схожие ориентировки, в основном это север-северо-восточное и северо-западное простирание. На отдельных участках, главным образом прибрежных, север-северо-восточное простирание меняется на северо-восточное. Ориентировки трещин, как и в вышеописанных районах, практически полностью совпадают с направлением эрозионной сети. Поле напряжений, восстановленное по бороздам скольжения, изменяется от север-северо-восточного положения оси сжатия в прибрежных областях до восток-северо-восточного на левом склоне долины р. Псезуапсе в 3,5 км вниз по течению от пос. Марьино, что также коррелирует с линиями вытянутости эрозионной сети.

В окрестностях пос. Лермонтово и Джубга, на южном склоне Главного Кавказского хребта (Анапско-Агойская зона), основные системы трещин в толще переслаивания серых мергелей и аргиллитов датского яруса имеют субмеридиональное и северо-западное простирание, что также соответствует ориентировке эрозионной сети.

Таким образом, на основании полученных данных можно сделать следующие выводы: во-первых, трещиноватость горных пород, независимо от их возраста, определяет характер ориентировки современной эрозионной сети, что позволяет использовать анализ простирания последней для выявления тектонической раздробленности; во-вторых, линии вытянутости эрозионной сети коррелируют с полем тектонических напряжений, что дает возможность использовать их для реконструкции новейшего поля напряжения для территории Северо-Западного Кавказа.

В результате проведенных исследований построена схема роз-диаграмм, линий вытянутости и степени вытянутости эрозионной сети Северо-Западного Кавказа и проведено сопоставление схемы с сейсмичностью. Отметим, что розы-диаграммы и линии вытянутости коррелируют с ориентированной современного поля напряжения, а степень вытянутости — с его величиной. Подтверждает гипотезу совпадение этого параметра с распределением землетрясений. Максимальное число эпицентров тяготеет к зонам высокой степени вытянутости рельефа. График корреляции между этими параметрами свидетельствует о прямой зависимости между ними (коэффициент корреляции равен 0,37).

Сейсмичность Кавказа и прилегающих акваторий. Статистический анализ сейсмичности показал, что распределение землетрясений подчинено неотектонической зональности. Землетрясения приурочены как к разрывам и линеаментам, так и к молодым растущим поднятиям, особенно к их перифериям. Районы с разной плотностью эпицентров часто контролируются протяженными поперечными зонами разрывов (Новороссийской, Туапсинской, Курджиновской и др.). Максимумы приурочены к Центральному сегменту Кавказа (район г. Домбай-Ульген с отметкой 4046 м) и к области Черноморского бассейна, примыкающей к Рионской впадине. Высокие значения плотности землетрясений характерны для молодых поднятий Центрального Предкавказья (Джинальский, Пастбищный хребты) и структур Центрального сегмента Кавказского хребта. Согласно кластерному статистическому анализу сейсмичности площади с высоким средним значением выделенной энергии расположены в Центральном и на периферии Северо-Западного сегмента Кавказа.

Изучение пространственного распределения сейсмичности изучаемой территории выполнено методом кластерного анализа с помощью встроенной функции системы ArcGis «Анализ группирования». При этом учитывалась неравномерность распределения гипоцентров землетрясений по глубине. В результате статистического анализа распределения сейсмичности кластеризация выполнена для трех глубинных уровней: <3 км, от 3

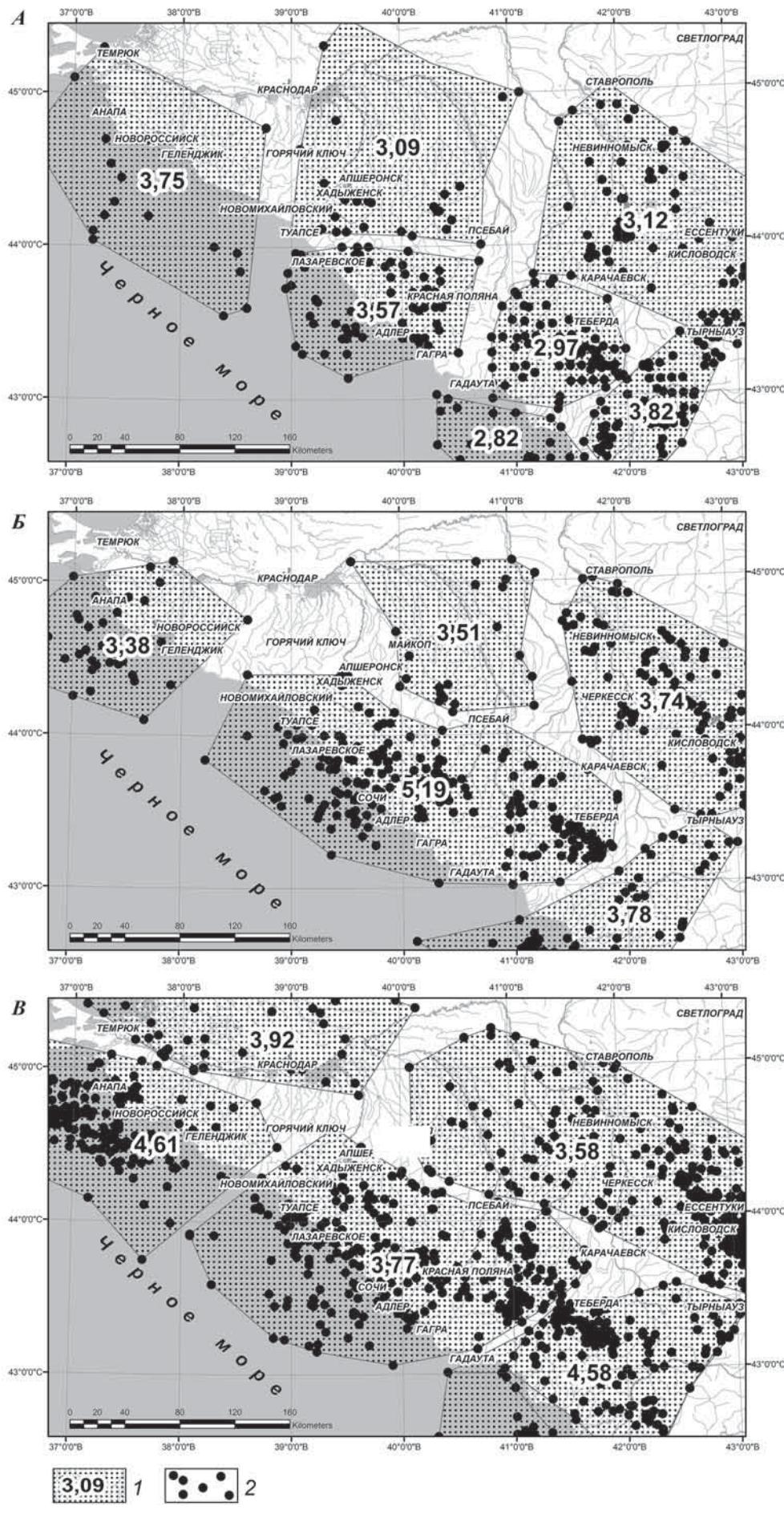


Рис. 4. Результаты кластерного анализа землетрясений, гипоцентры которых расположены на глубине (км): А — <3, Б — 3-9, В — >9; 1 — кластерные группы землетрясений и средние значения магнитуды; 2 — землетрясения

до 9 км и >9 км. Землетрясения каждого глубинного уровня разбиты на максимально допустимое в программе ArcGis число кластеров. Сравнение всех соседних кластеров между собой методом оценки разности выборочных средних позволило объединить некоторые кластеры по принципу статистической значимости среднего значения выделившейся сейсмической энергии. Среднее значение магнитуды вычислено через среднюю сейсмическую энергию. Величина сейсмической энергии рассчитывалась по формуле

$$E = 10^{(2M_n+4,8)},$$

где E — сейсмическая энергия землетрясения, M_n — магнитуда землетрясения. В результате расчетов на глубине <3 км выделено 8 кластерных групп, на глубине от 3 до 9 км — 5 групп, а на глубине >9 км — 6 групп (рис. 4). Для кластеров землетрясений с глубиной гипоцентров <3 км наблюдается четкая приуроченность к основным структурным элементам Северо-Западного Кавказа.

Отметим, что выявленные кластеры характеризуются разным выделением сейсмической энергии (для удобства восприятия средняя сейсмическая энергия переведена в среднюю магнитуду). Как и следовало ожидать, землетрясения с малоглубинными гипоцентрами — низкомагнитудные. Периферийные группы кластеров приурочены к северным и южным склонам орогена, Ставропольскому поднятию, Западно- и Восточно-Кубанским впадинам, а также к северо-восточной части Черноморской впадины. Важно отметить, что для глубины <3 км самой высокобалльной является группа, соответствующая западной части Кавказского орогена, что вызвано активным ростом новейших структур. Выявленные группы разделены на поперечные сегменты, которые, возможно, связаны с зонами разрывных нарушений субмеридионального простирания (рис. 4, А).

Для глубины от 3 до 9 км выделено 5 кластерных групп, которые вытянуты в северо-западном и северо-восточном направлениях. Для этого диапазона глубины количество выделившейся сейсмической энергии на порядок выше, чем для малоглубинных групп, причем выделение большой сейсмической энергии характерно для восточной части Северо-Западного Кавказа (Гойтхский антиклиниорий и Абхазо-Рачинская зона), а также для переходной области между Ставропольским поднятием и Лабино-Малкинской моноклинальной зоной. На территории Новороссийского синклиниория и Восточно-Кубанской впадины наблюдается наименьшее для этих значений глубин выделение сейсмической энергии (рис. 4, Б).

Кластеризация сейсмических событий с глубиной гипоцентра >9 км позволила выделить 6 групп (рис. 4, В). Для этих значений глубины все кластеры вытянуты в северо-западном направле-

нии. Появляется группа землетрясений в районе Западно-Кубанской впадины, что не характерно для менее глубоких землетрясений. Наблюдается кластерная группа в районе Лабино-Малкинской моноклинальной зоны и Восточно-Кубанской впадины. Заметно увеличивается величина средней магнитуды кластеров с увеличением глубины гипоцентров землетрясений на территории Новороссийского новейшего поднятия и на южном склоне орогена Северо-Западного Кавказа, в то время как на северном склоне количество выделяемой энергии меняется не так заметно (рис. 4, В).

Отметим, что на разной глубине количество выделяемой сейсмической энергии различно. Оценить эти различия можно с помощью графиков повторяемости землетрясений (рис. 5). Для малоглубинных землетрясений (<3 км) наклон графика повторяемости наименьший. Для глубины от 3 до 9 км он становится более крутым, а для землетрясений с глубиной >9 км наклон графика повторяемости наибольший. Таким образом, наблюдается закономерное увеличение частоты возникновения землетрясений и величины выделяемой сейсмической энергии с глубиной.

Заключение. Таким образом, в результате комплексных исследований, включавших структурно-геоморфологический, морфометрический анализ, полевые замеры трещиноватости горных пород и кластерный анализ сейсмичности, сделаны следующие выводы. На карте новейшей тектоники Северо-Западного и Центрального секторов Большого Кавказа выделено асимметричное сводово-глыбовое поднятие с пологим северным и крутым южным склонами. Оно нарушено субширотными, субмеридиональными и диагональными разрывами, надвигами, взбросами, сбросами, часто со сдвиговой составляющей. Некоторые разрывные нарушения наследуют более древние разломы, которые были подновлены в новейший этап. Вдоль этих разрывов часто выстраиваются эпицентры землетрясений, что указывает на их активизацию на современном этапе.

По результатам полевых замеров трещин установлено, что трещиноватость горных пород, причем независимо от их возраста, определяет характер ориентировки современной эрозионной сети. Сопоставление трещиноватости горных пород, линий и степени вытянутости эрозионной сети с сейсмичностью показало, что максимальное число эпицентров тяготеет к зонам высокой степени вытянутости рельефа. Линии вытянутости коррелируют с ориентировкой современного поля напряжения, а степень вытянутости — с его величиной.

Морфометрический анализ показал высокую степень статистической корреляции между плотностью землетрясений и величиной вертикального расчленения рельефа, скоростью современных

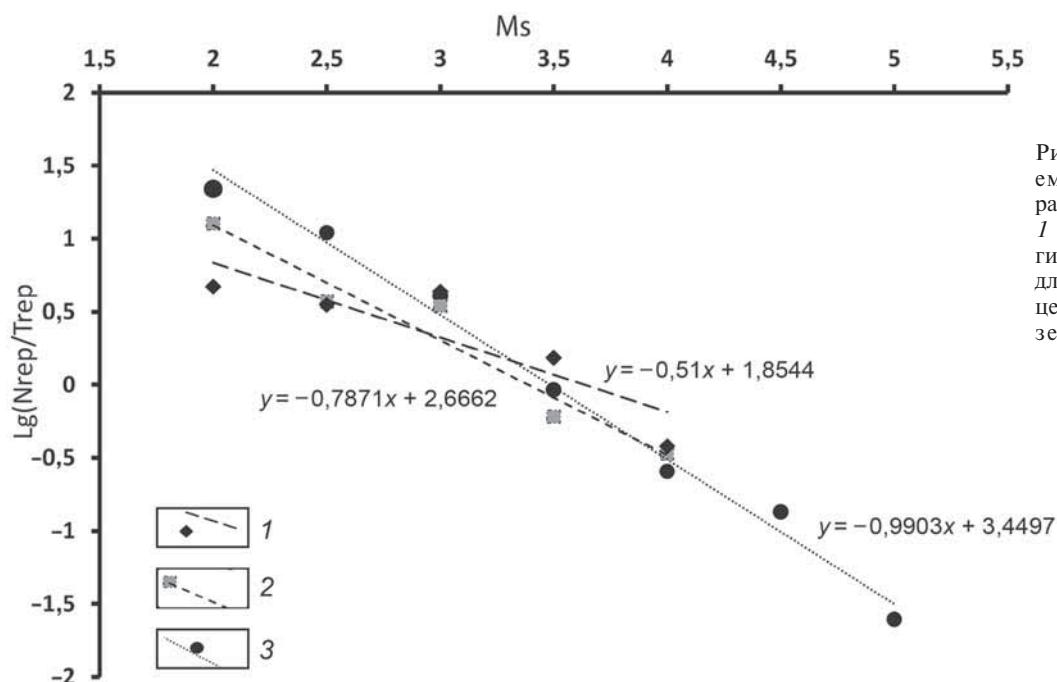


Рис. 5. Графики повторяемости землетрясений на разных глубинных уровнях:
1 — для землетрясений с гипоцентрами <3 км, 2 — для землетрясений с гипоцентрами 3–9 км, 3 — для землетрясений с гипоцентрами >9 км

вертикальных движений, что позволяет рекомендовать эти параметры для прогноза сейсмичности.

Горное сооружение Большого Кавказа испытывает на новейшем этапе активный рост и разрастание в сторону обрамляющих его предгорных впадин и акваторий. Этот рост сопровождается сейсмической активностью, которая увеличивается с глубиной и согласуется с новейшим структурным планом Кавказа.

Финансирование. Исследования проведены в рамках НИР «Развитие методов детального сейсмического районирования и сейсмического микрорайонирования» (№ гос. регистрации АААА-А17-117060110060-3) (ИФЗ РАН) при финансовой поддержке РФФИ в рамках конкурса научных проектов КОМФИ (№ 18-00-00247 и № 18-00-00342), входящих в состав комплексного проекта (№ 18-00-00344).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

База данных государственных геологических карт. Электронный ресурс: URL: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html> (дата обращения: 02.04.2020).

Златопольский А.А. Пакет прикладных программ выделения и анализа линейных элементов аэрокосмических изображений // Автоматизированный линеаментный анализ при структурно-геологических и металлогенических исследованиях. М.: Недра, 1988. С. 14–28.

Костенко Н.П., Панина Л.В. Позднеорогенная структура Предкавказья // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2001. № 1. С. 11–20.

Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.

Несмеянов С.А. Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа (Опережающие исследования для инженерных изысканий). М.: Недра, 1992. 254 с.

Несмеянов С.А. Геоморфологические аспекты палеэкологии горного палеолита (на примере Западного Кавказа). М.: Научный мир, 1999. 391 с.

Несмеянов С.А. Детальное морфоструктурное районирование и новейшие шовные зоны Большого Кавказа // Проблемы геоморфологии и геологии Кавказа и

Предкавказья: Мат-лы междунар. совещ. «Геоморфология гор и равнин: взаимосвязи и взаимодействие». XXIV пленум геоморфологической комиссии РАН. Краснодар, 2001. С. 72–78.

Овсяченко А.Н. Сейсмотектоника и элементы современной геодинамики Северо-Западного Кавказа по данным палеосейсмологических исследований: Автoref. канд. дисс. М., 2006.

Попков В.И. Тектоника Северо-Западного Кавказа // Изв. Отделения наук о Земле и природных ресурсов. Академия наук Республики Башкортостан. Геология. 2007. № 11. С. 13–18.

Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н. Сейсмическая и геологическая активность тектонических нарушений Северо-Западного Кавказа // Физика Земли. 2005. № 6. С. 29–42.

Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И. и др. Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. 256 с.

Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1960. 69 с.

Поступила в редакцию 29.09.2020

Поступила с доработки 30.10.2020

Принята к публикации 30.10.2020