УДК 55(1/9)

ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ МОРФОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ РЕЛЬЕФА И ПОКАЗАТЕЛЯМИ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИМИ СОВРЕМЕННУЮ СЕЙСМИЧНОСТЬ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

А.О. Агибалов[1, 2], В.А. Зайцев[2], А.А. Сенцов[1]

[1]*Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*

[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

Территория Северо-Западного Кавказа достаточно хорошо изучена в геолого-геоморфологическом отношении, однако вопрос оценки взаимосвязи между рельефом и сейсмичностью на количественном уровне представляется недостаточно проработанным. На основе цифровой модели рельефа (ЦМР) разрешением 1 секунда (около 30 м) [Цифровая…, 2020] (рис. 1) нами были построены схемы морфометрических показателей, традиционно используемых в практике геоморфологических исследований [Симонов, 1999] и опосредованным образом связанных с характером неотектонических движений. К ним относятся: 1) крутизна склонов (рис. 2); 2) стандартные отклонения высот; 3) глубина вертикального расчленения (рис. 3); 4) плотность линеаментов (рис. 4); 5) разности базисных поверхностей 3 и 4, 4 и 5, 5 и 6 порядков (рис. 5-7). Первые 3 из перечисленных показателей характеризуют вертикальную расчлененность рельефа. Согласно [Нетребин, 2012, Философов, 1967], растущие новейшие поднятия, в общем случае, отличаются более контрастным, глубоко расчлененным рельефом по сравнению с испытывающими опускание участками. Для расчета глубины вертикального расчленения по методике А.И. Спиридонова [1975] изучаемая территория была разделена на квадратные ячейки, центрам которых были присвоены разности максимальной и минимальной высотных отметок. Линеаменты выделялись нами по комплексу геоморфологических признаков – резким перегибам рельефа, спрямленным участкам гидросети и т. д., более подробно рассмотренным в работе [Панина, 2019]. В этой связи параметр «плотность линеаментов» отражает горизонтальную и вертикальную расчлененность рельефа, а его взаимосвязь с новейшими тектоническими движениями аналогична первым трем из упомянутых морфометрических характеристик. Согласно [Философов, 1960], по повышенным значениям разности базисных поверхностей выделяются новейшие поднятия. Для составления схем разности изобазит с помощью программы «ArcGis» по методике [Нгуманов и др., 2016] нами был выполнен автоматизированный анализ ЦМР, предполагающий определение порядков водотоков и высотных отметок их базисов. Общее количество порядков водотоков – 8, из них для

последующего анализа были выбраны речные долины 3-6 порядков, поскольку водотоки старших порядков достаточно редки, а водотоки 1-3 порядков имеют малую протяженность, следовательно, соответствующие базисные поверхности практически полностью повторяют поверхность современного рельефа. По повышенным значениям высот, глубины вертикальной расчлененности рельефа, плотности линеаментов и крутизне склонов (см. рис. 1-4) выделяется южная часть изучаемой области. На схемах разности изобазит (см. рис. 5-7) показано, что повышенные значения этого параметра характерны для юго-восточного сегмента рассматриваемой территории, свидетельствующие об устойчивом поднятии последнего на протяжении времени формирования водотоков 3–6 порядков.

Рассчитанные морфометрические показатели были сопоставлены с характеризующими современную сейсмичность параметрами — плотностями эпицентров землетрясений (рис. 8) и активных разломов (рис. 9), рассчитанным по данным [Рогожин и др., 2014], скоростями современных вертикальных движений [Овсюченко, 2006] (рис. 10). Установленная численная корреляция (таблица) свидетельствует о высокой степени взаимосвязи между рельефом и сейсмичностью.

Кроме того, нами было выполнено компьютерное геодинамическое моделирование с помощью программы «RMS 2013» компании «ROXAR» по методике, аналогичной описанной в работе [Агибалов и др., 2019]. Исходными материалами являлись ЦМР, схема активных разломов, составленная Е.А. Рогожиным и его коллегами [2014] (см. рис. 9), осредненные характеристики геологической среды. По высотам рельефа была построена grid-поверхность, на которую нанесена сетка активных разломов. После этого указывался тип внешней нагрузки и проводился расчет ряда параметров (относительных амплитуд горизонтальных и вертикальных перемещений по разломам, вероятности формирования новых разрывов малой протяженности и др.), физико-математической основой которого является использование закона Кулона-Мора. В качестве внешней нагрузки было указано горизонтальное сжатие, ось которого ориентирована по азимуту 20º. Выбор этого типа напряженного состояния обусловлен тем, что при нем достигаются максимальные значения коэффициентов корреляции Пирсона между рассчитанными с помощью моделирования параметрами и реальными характеристиками геолого-географической среды. Кроме того, он не противоречит общим представлениям о северо-восточном сжатии горного сооружения Кавказа [Маринин, Сим, 2015]. При моделировании принимался ряд допущений: предполагалось, что среда является упругой, перемещения по разломам, которые не должны пересекаться, происходят до полной релаксации напряжений, все разломы вертикальны,

величины напряжений достаточны для формирования новых разрывов малой протяженности. Более подробно они описаны в [Руководство…, 2020].

Основным результатом моделирования является схема областей, в пределах которых возможно формирование новых разрывов малой протяженности (параметр «Fracture regions») (рис. 11). При присвоении таким областям единичных значений, а всем остальным участкам – нулевых, достигается численная корреляция между параметром «Fracture regions» и плотностью эпицентров землетрясений (коэффициент корреляции Пирсона 0,44), скоростями современных вертикальных движений (0,65), высотами рельефа (0,48), крутизной склонов (0,49), плотностью линеаментов (0,52).

Таким образом, проведенные исследования позволили показать на количественном уровне высокую степень взаимосвязи между рельефом и сейсмичностью Северо-Западного Кавказа, получить новые данные, дополняющие и уточняющие существующие представления о новейшей геодинамике этого региона.

	Плотность эпицентров землетрясений, м$^{-1}$	**Скорость вертикальных движений, мм/год**	**Плотность активных разломов, м$^{-1}$**
Высота рельефа, м	0,70	0,79	0,53
Крутизна склонов, ^{o}	0,74	0,72	0,70
Стандартные отклонения высот, м	0,75	0,76	0,70
Глубина вертикального расчленения, м	0,76	0,78	0,70
Плотность линеаментов, м$^{-1}$	0,41	0,64	0,68
Разности базисных поверхностей, м:			
а) 3 и 4 порядков	0,48	0,53	0,44
б) 4 и 5 порядков	0,39	0,46	0,35
в) 5 и 6 порядков	0,45	0,57	0,39

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

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы ИФЗ РАН и при финансовой поддержке РФФИ в рамках конкурса научных проектов КОМФИ 18-00-00247, входящего в состав комплексного проекта (18-00-00344).

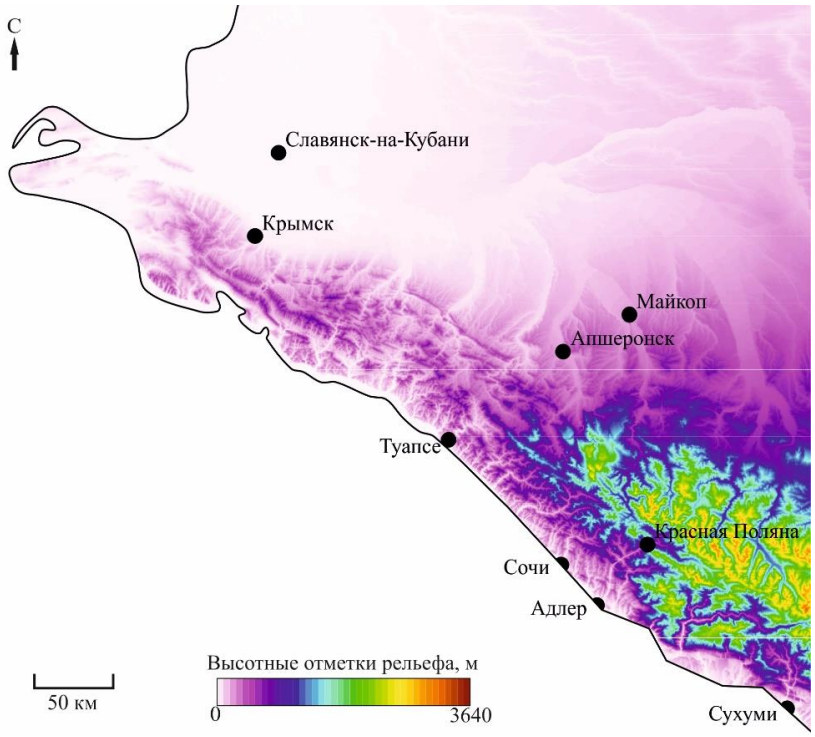

Рис. 1. Карта рельефа Северо-Западного Кавказа, составленная на основе ЦМР [Цифровая…, 2020].

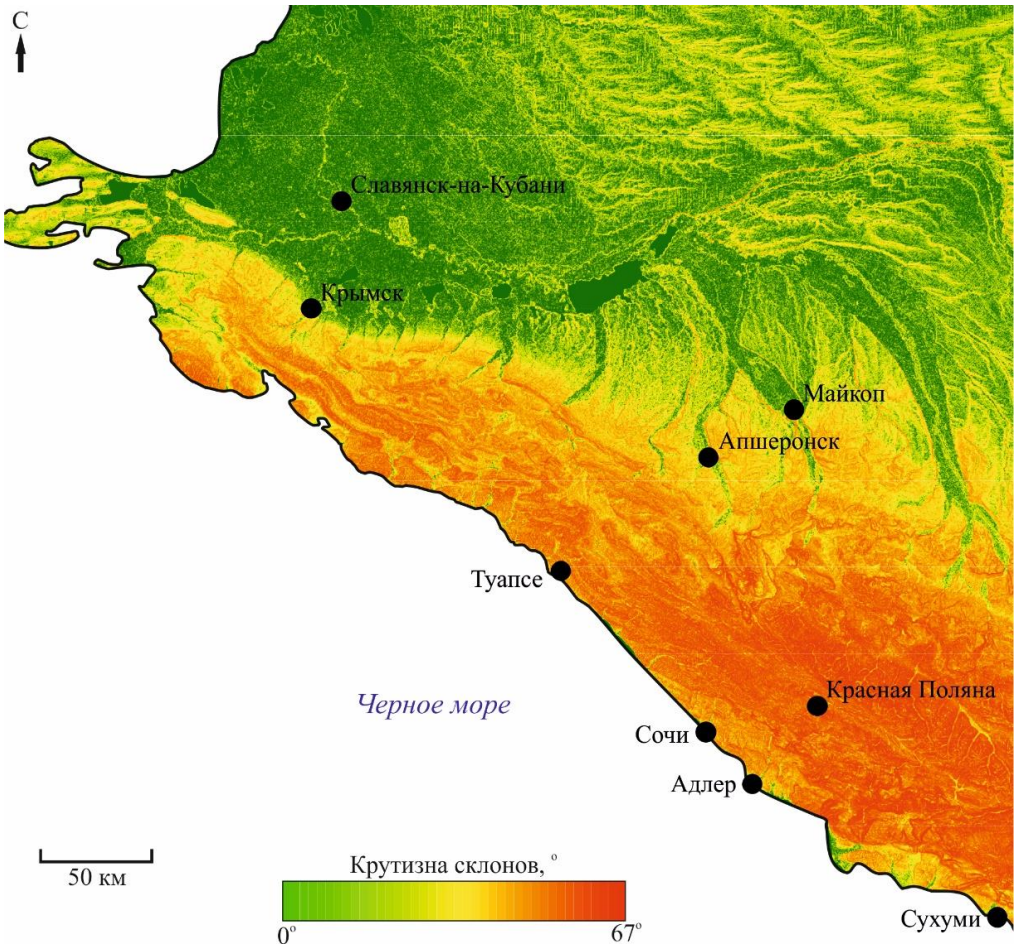

Рис. 2. Схема крутизны склонов Северо-Западного Кавказа.

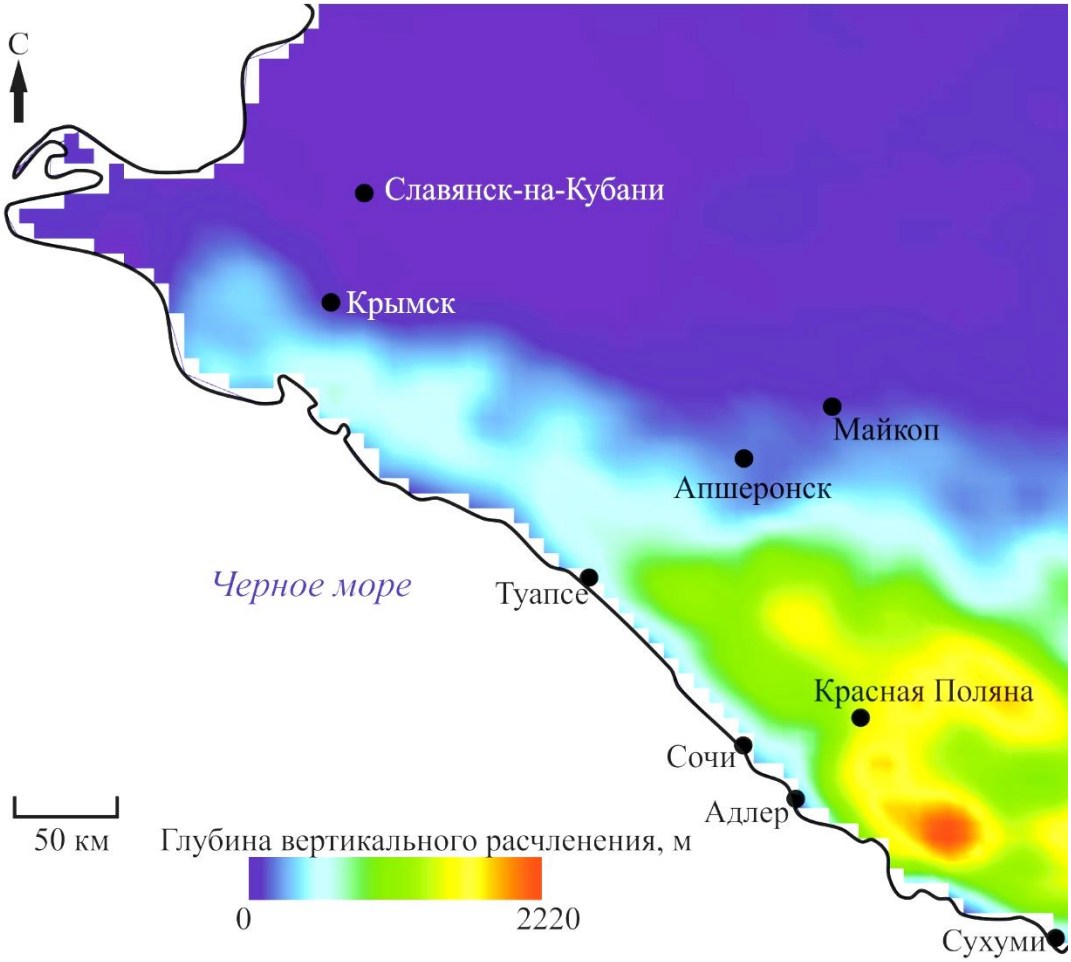

Рис. 3. Схема вертикальной расчлененности рельефа Северо-Западного Кавказа.

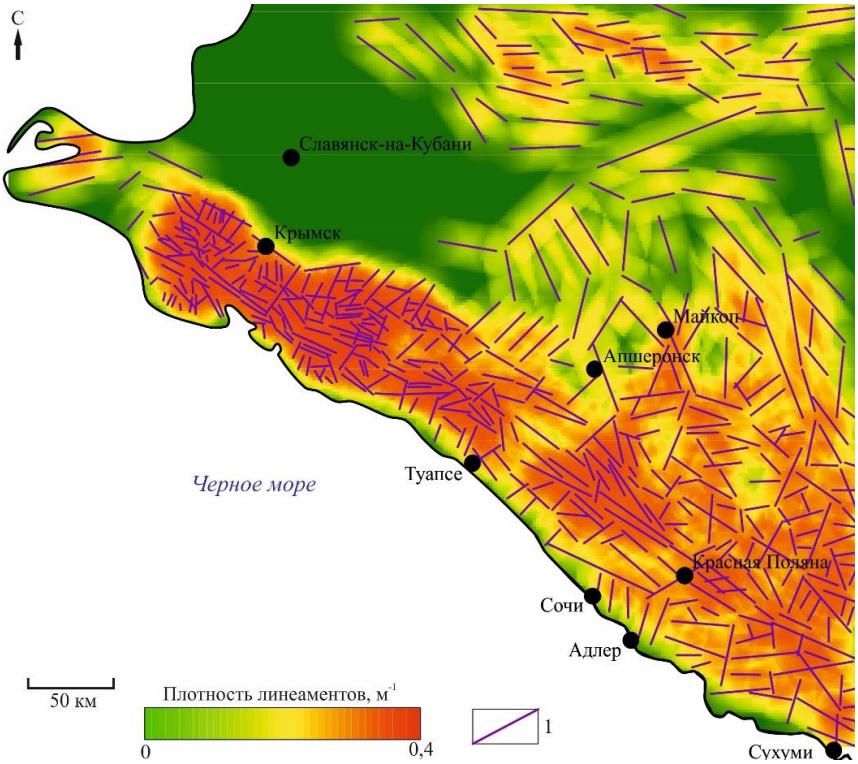

Рис. 4. Схема плотности линеаментов Северо-Западного Кавказа: *1 – линеаменты.*

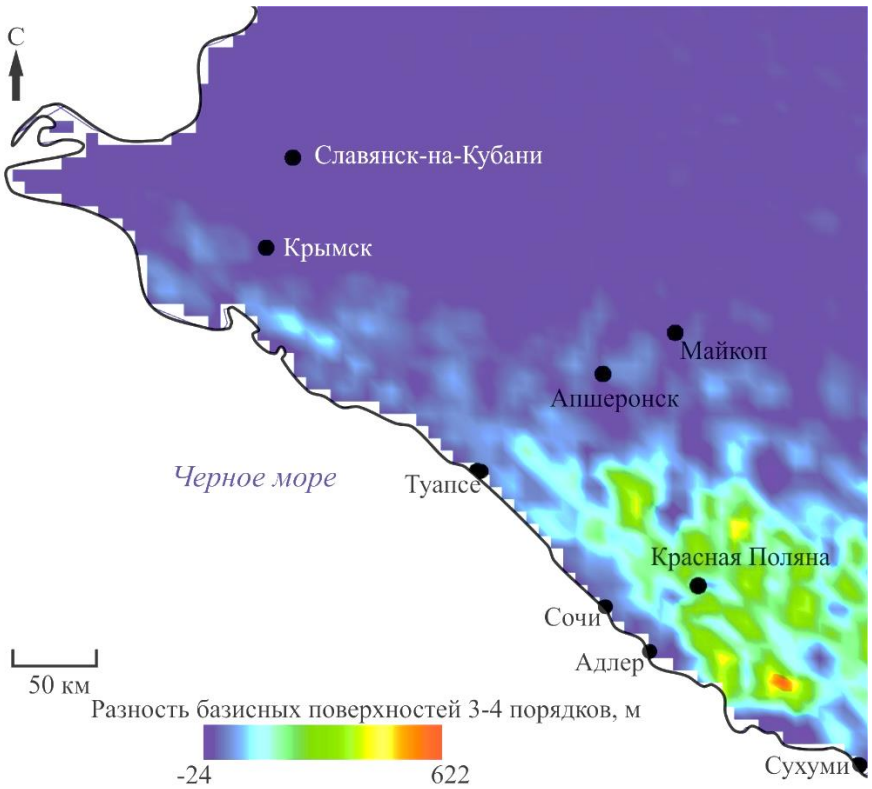

Рис. 5. Схема разностей базисных поверхностей 3-4 порядков Северо-Западного Кавказа.

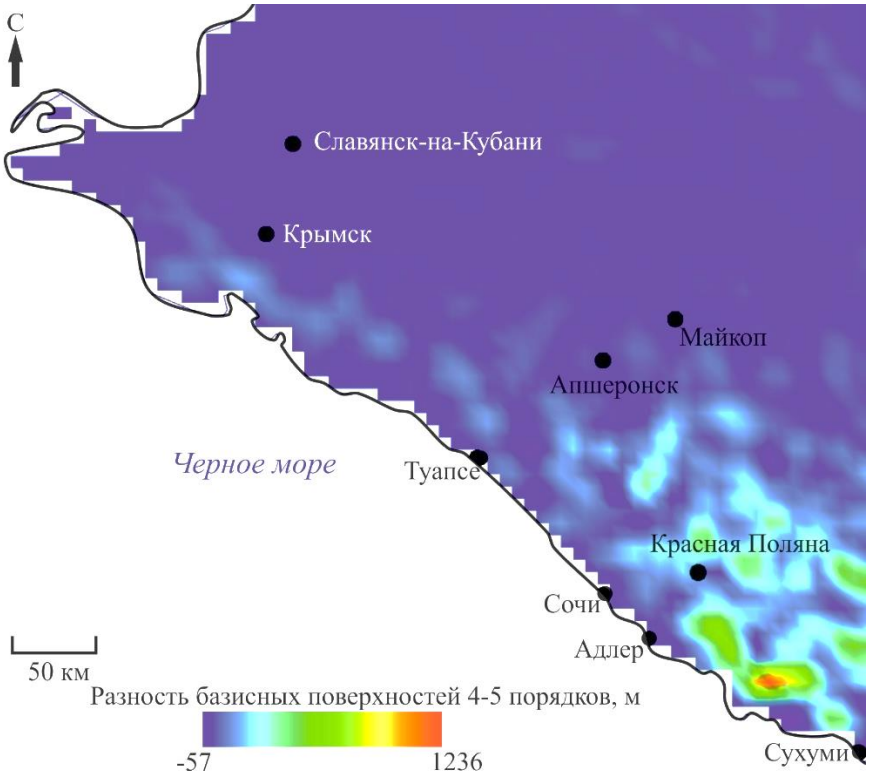

Рис. 6. Схема разностей базисных поверхностей 4-5 порядков Северо-Западного Кавказа.

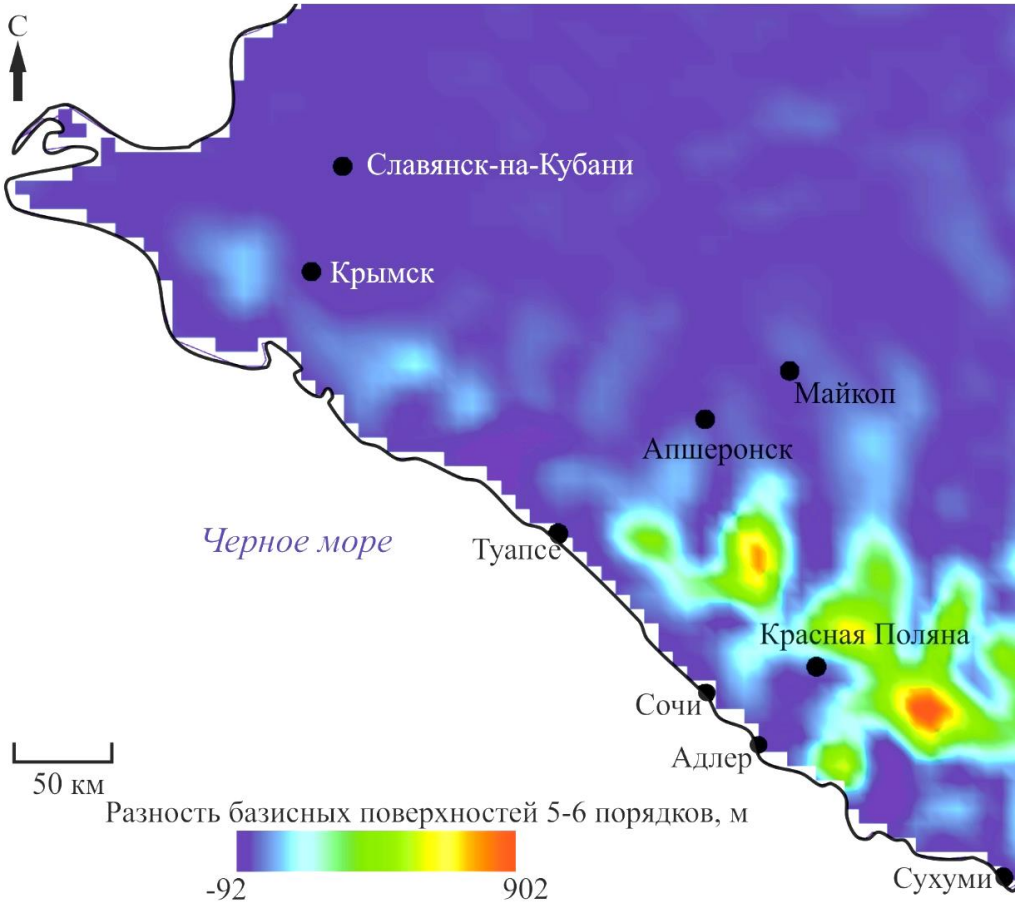

Рис. 7. Схема разностей базисных поверхностей 5-6 порядков Северо-Западного Кавказа.

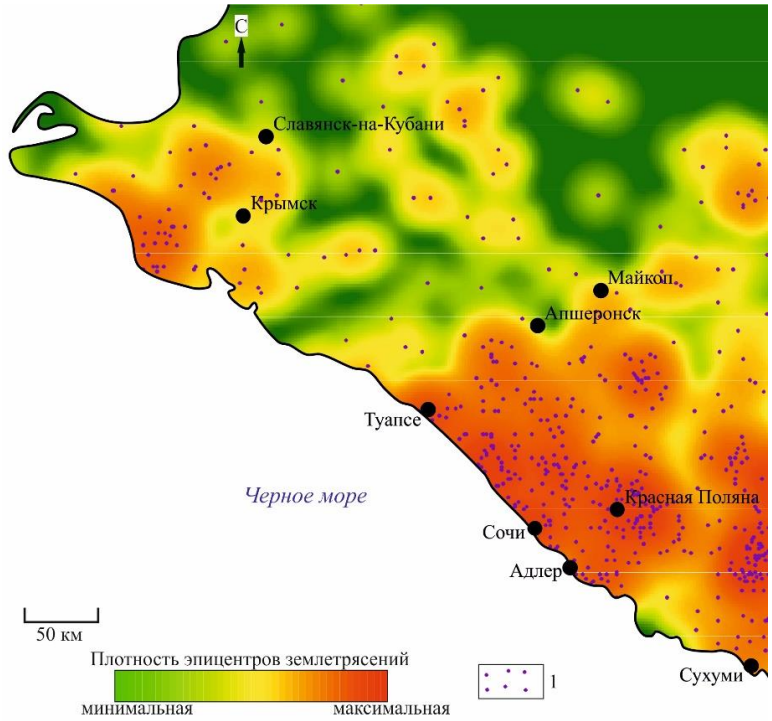

Рис. 8. Схема плотности эпицентров землетрясений Северо-Западного Кавказа: *1 – эпицентры землетрясений, по [Рогожин и др., 2014].*

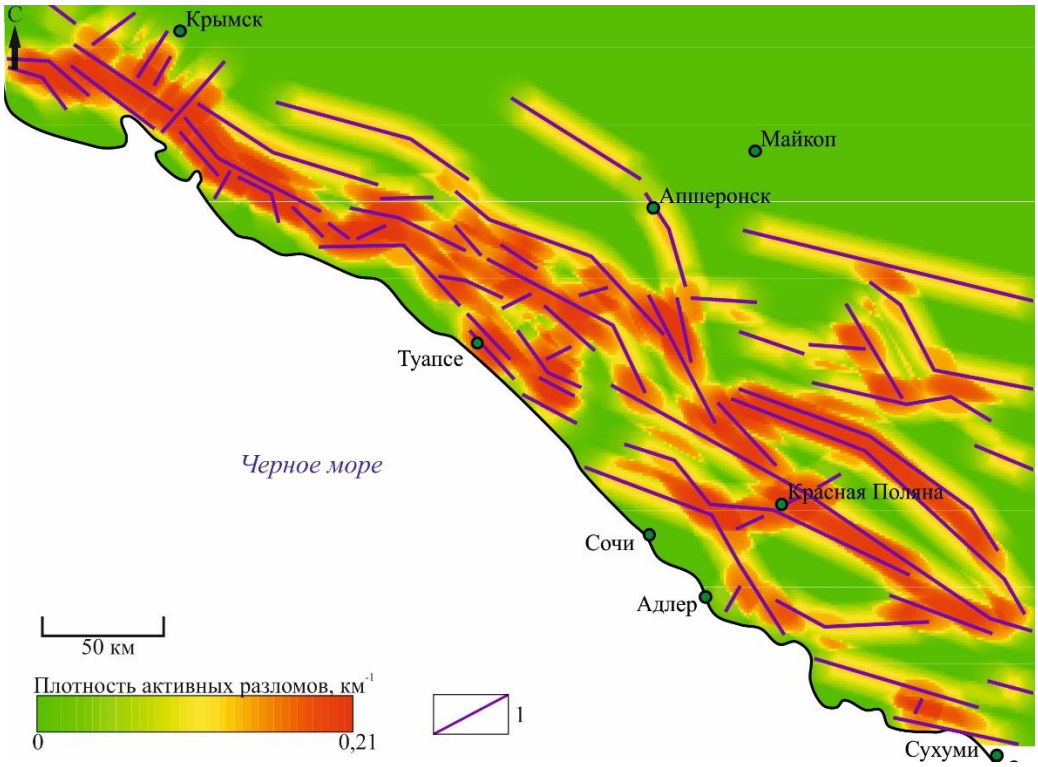

Рис. 9. Схема плотности активных разломов Северо-Западного Кавказа: *1 –активные разломы, по [Рогожин и др., 2014].*

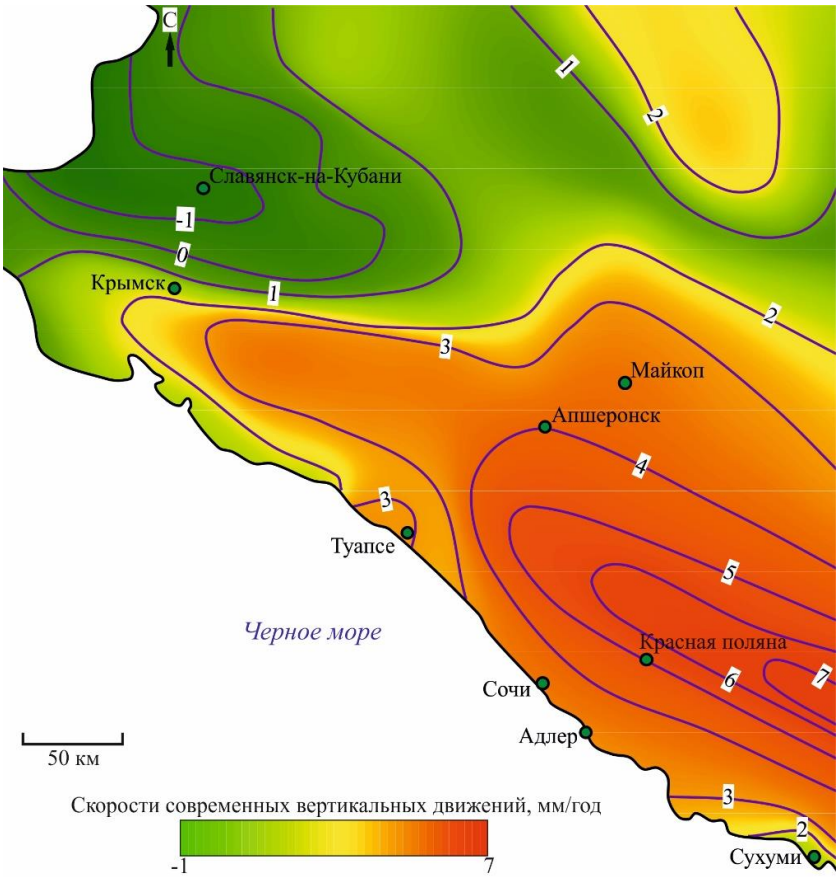

Рис. 10. Схема скоростей современных вертикальных движений Северо-Западного Кавказа, по [Овсюченко, 2006].

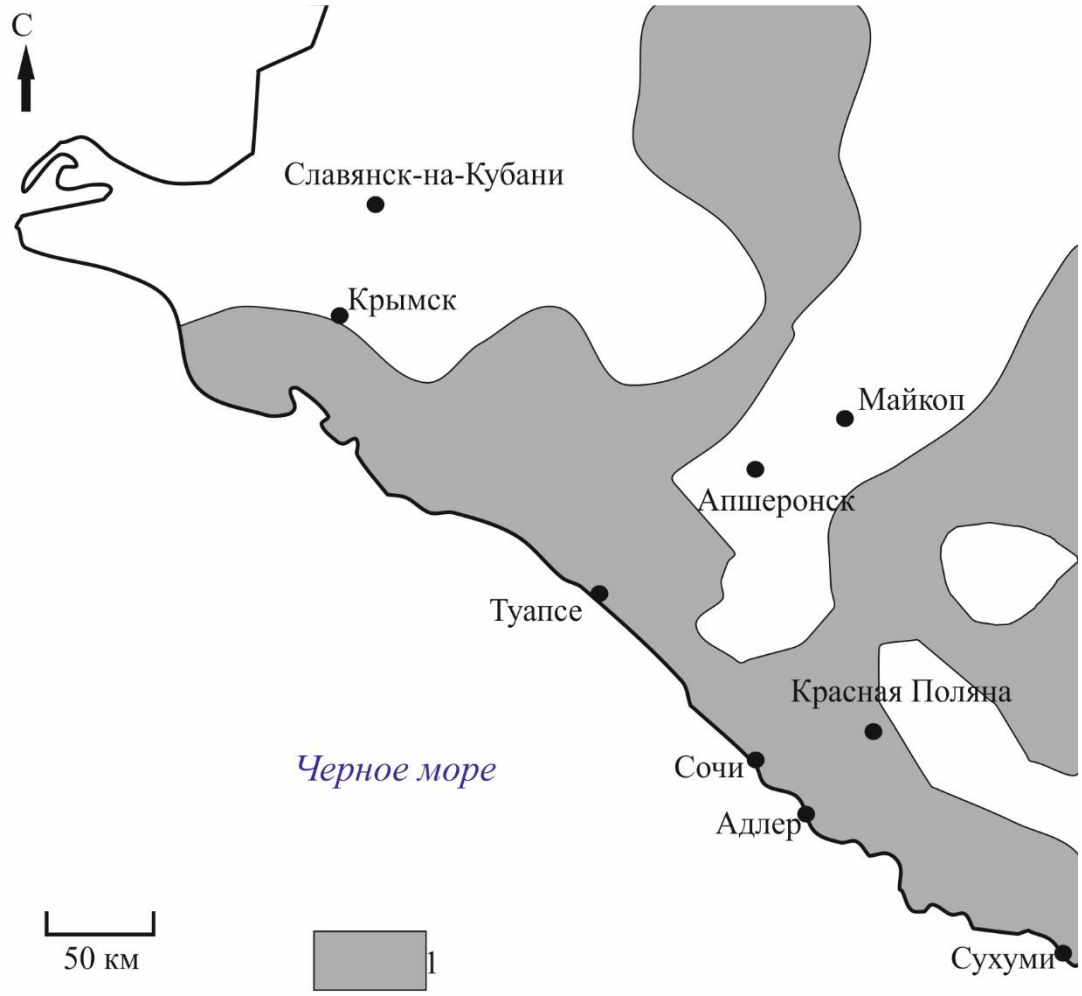

Рис. 11. Схема участков возможного формирования новых разрывов малой протяженности, составленная с помощью компьютерного моделирования: *1 – области формирования новых разрывов малой протяженности.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агибалов А.О., Сенцов А.А., Зайцев В.А. Отражение гранито-гнейсовых куполов Приладожья в современном рельефе // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2018. № 5. С. 72-80.

Маринин А.В., Сим Л.А. Новейшее напряженное состояние и деформации на западном погружении Большого Кавказа // Геотектоника. 2015. Т. 49. № 5. С. 411-424.

Нгуманов И.И., Нгуманова Е.Г., Чернова И.Ю. Основы морфометрического поиска неотектонических структур. Казань: Казанский университет, 2016. 53 с.

Нетребин П.Б. Морфометрический анализ рельефа Большого Кавказа. Дис. ... канд. геогр. наук. Краснодар: Кубанский государственный университет, 2012. 227 с.

Овсюченко А.Н. Сейсмотектоника и элементы современной геодинамики Северо-Западного Кавказа по данным палеосейсмологических исследований. Дис. … канд. геол.-мин. наук. М.: ИФЗ РАН, 2006. 172 с.

Панина Л.В. Новейшие структуры и рельеф Земли. М.: «Перо», 2019. 115 с.

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

Руководство пользователя «Analysis Package Reservoir Modelling System (RMS)» [Электронный ресурс]. URL: www.geodisaster.ru/index.php?page=uchebnye-posobiya-2 (дата обращения: 10.10.2020).

Симонов Ю.Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС, 1999. 251 с.

Спиридонов А.И. Геоморфологическое картографирование. М., Недра, 1975. 184 с.

Философов В.П. Методика вычисления и геолого-геоморфологическая интерпретация коэффициента расчлененности рельефа // Вопросы морфометрии. 1967. Т. 1. Вып. 2. С. 112–146.

Цифровая модель рельефа. URL. http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp. Дата обращения 2.09.2020.