

**SEISMOTECTONIC ANALYSIS OF THE VIRAAYOTS–KARABAKH ZONE (ARMENIA)  
AND THE ADJACENT AREAS OF LESSER CAUCASUS**K.S. Ghazaryan <sup>1</sup>✉, R.S. Sargsyan <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Nazarov Institute of Geophysics and Engineering Seismology, Armenian National Academy of Sciences, 5 V. Sargsyan St, Gyumri 3115, Armenia

<sup>2</sup>Nalbandyan Shirak State University, 4 Paruyr Sevak St, Gyumri 3126, Armenia

**ABSTRACT.** The territory of Armenia, although relatively small, is geologically and tectonically complex. Its complexity is not only due to a dense network of faults. It results from a complicated history of tectonic development including several phases of mountain formation and planation, and the extensive development of fold-block, tectonic and magmatic processes. An important scientific task is identification of earthquake-prone structural blocks by analysing seismotectonic data on geotectonic zones in Armenia. This article describes the seismotectonic analysis of geological and geophysical data on the Viraaayots-Karabakh zone.

We used a wide spectrum of modern tectonic-geomorphological indices and GIS technologies in order to assess the neotectonic (Neogene – Quaternary) activity of the main block units of the study area and to classify the block units by their tectonic activity levels. Tectonics of the study area is contrasting, and many tectonically active blocks are in the immediate neighbourhood with passive blocks.

Based on the records of seismic events of various magnitudes and historic earthquake data, we analysed modern seismicity of the block units. For each block, a quantitative analysis of its total seismic energy release was performed, and relationships between the released seismic energy values and the number of recorded earthquakes were analyzed. Based on such analysis, we identify a group of blocks wherein the total released seismic energy values are high, but the numbers of seismic events recorded in these blocks are rather limited. In the context of block tectonic activity, analysing these data makes it possible to detect the blocks with the highest probability of the occurrence of strong earthquakes.

**KEYWORDS:** tectonic activity; seismicity; earthquake-prone block; Viraaayots–Karabakh zone

**SHORT COMMUNICATION**

Received: December 26, 2019

Revised: May 27, 2020

Accepted: June 10, 2020

**Correspondence:** Karlen S. Ghazaryan, [g.karlen90@bk.ru](mailto:g.karlen90@bk.ru)

**FOR CITATION:** Ghazaryan K.S., Sargsyan R.S., 2021. Seismotectonic analysis of the Viraaayots–Karabakh zone (Armenia) and the adjacent areas of Lesser Caucasus. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (1), 157–165. doi:10.5800/GT-2021-12-1-0519

## СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВИРАЙОЦ-КАРАБАХСКОЙ ЗОНЫ ТЕРРИТОРИИ АРМЕНИИ И ПРИЛЕЖАЩИХ ЧАСТЕЙ МАЛОГО КАВКАЗА

К.С. Казарян<sup>1</sup>, Р.С. Саргсян<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН РА, 3115, Гюмри, ул. В. Саргсяна, 5, Армения

<sup>2</sup> Ширакский государственный университет им. М. Налбандяна, 3126, Гюмри, ул. Паруйра Севака, 4, Армения

**АННОТАЦИЯ.** Территория Армении характеризуется довольно сложным геолого-тектоническим строением. Оно обусловлено не только густой сетью разрывных образований, но еще и сложной историей тектонического развития, состоявшего из нескольких фаз горообразования и планации, широким распространением складчатоглыбовых и тектономагматических процессов. Для территории Армении особое научное значение имеет сейсмо-тектонический анализ ее геотектонических зон с целью выделения сейсмоопасных структур. В статье проведен сейсмо-тектонический анализ Вирайоц-Карабахской зоны по геолого-геофизическим методам и данным.

Применен широкий спектр современных тектоно-геоморфологических индексов и ГИС-технологий, с помощью которых выполнена оценка неотектонической (неоген-четвертичной) активности блоковых единиц территории и их дальнейшая классификация по степени активности. Установлено, что исследуемая зона характеризуется довольно контрастной тектоникой. Во многих случаях тектонически активные блоки непосредственно граничат с пассивными.

Проанализирована современная сейсмичность блоковых единиц, которая основывается на изучении зарегистрированных здесь сейсмических событий разной величины, а также данных о произошедших исторических землетрясениях. Проведен количественный анализ высвобожденной суммарной сейсмической энергии по каждому блоку, и проанализирована ее взаимосвязь с количеством зафиксированных сейсмических событий. В результате был выделен ряд блоков, в которых высокая суммарная высвобожденная сейсмическая энергия сопровождается довольно ограниченным количеством произошедших сейсмических событий. В результате анализа данной картины в контексте с тектонической активностью блоков были установлены блоки с высокой вероятностью возникновения сильного землетрясения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** тектоническая активность; сейсмичность; сейсмоопасная структура; Вирайоц-Карабахская зона

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема оценки сейсмо-тектонического потенциала сейсмоактивных регионов является одним из наиболее актуальных направлений в современных сейсмо-тектонических исследованиях. Если рассмотреть данную проблему в контексте двух основных задач, первая из которых – выявление сейсмоопасных структур территории, а вторая – собственно оценка сейсмо-тектонического потенциала этих структур, то стоит подчеркнуть, что настоящая статья посвящена решению первой задачи.

Для территории Армении, как для сейсмоактивного региона, исследования в данном направлении довольно ограничены и не отличаются многообразием.

Среди первых работ можно отметить статью [Gabrielyan, Piruzyan, 1972], в которой авторами впервые поднимается вопрос о пространственной приуроченности сильных и слабых землетрясений к определенным структурно-тектоническим зонам. В последние годы исследования по данному направлению проводятся в основном Институтом геофизики и инженерной сейсмологии НАН РА. Среди них работы [Gasparyan et al., 2019; Oganessian et al., 2008], в которых как основополагающие выступают понятия о сейсмоактивном слое и объеме блоков земной коры, а сами исследования

проводились согласно концепции «очаг – объем» [Bath, Duda, 1964]. В указанных работах оценка сейсмо-тектонического потенциала блоков произведена по формуле (1), в которой приводится эмпирическая связь между объемом блока и магнитудой:

$$\lg V = (9.58 \pm 0.51) + (1.47 + 0.14) \cdot M, \quad (1)$$

где  $V$  – объем блока, а  $M$  – магнитуда. Несмотря на то, что оценка потенциала здесь количественная, по нашему мнению, данный подход во многом основывается только на математических расчетах, а многим геолого-тектоническим факторам не уделяется должного внимания.

В настоящей статье авторы придерживаются общепринятого мнения, что блоки земной коры являются основными коллекторами тектонических напряжений, а разломы – местами их разрядки. При проведении сейсмо-тектонических исследований для оценки сейсмо-тектонического потенциала местности необходимо, в первую очередь, провести оценку тектонической активности блоков, в частности неотектонической. Можно предположить, что в блоках с высокой активностью накапливается больше энергии в сравнении с блоками низкой активности. Более многогранной является задача корректной интерпретации мест разрядки этих

напряжений. Конечно же, в первую очередь такими необходимо считать разломы, особенно те, которые отделяют активные блоки от пассивных. В таких ситуациях, по нашему мнению, создаются наиболее благоприятные условия для возникновения сильных землетрясений [Ghazaryan, Sargsyan, 2020]; следовательно, такие разломы и следует считать наиболее сейсмоопасными.

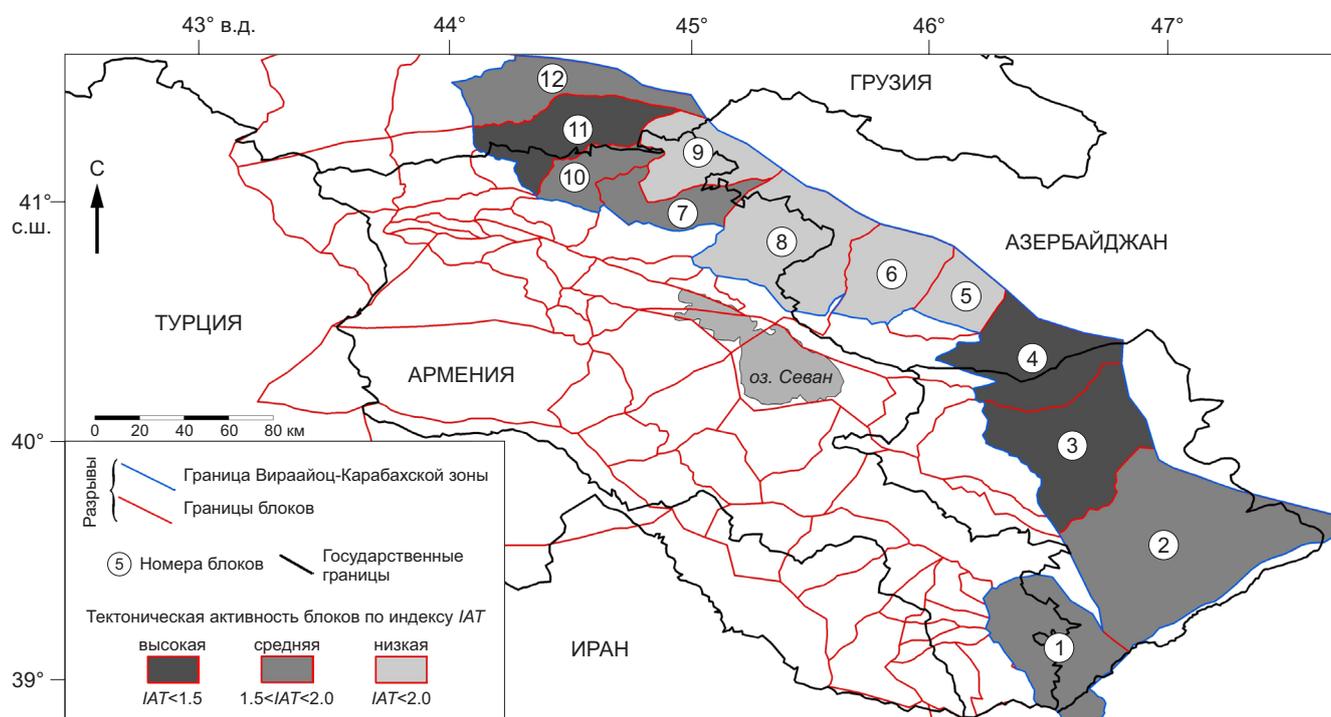
С целью выделения наиболее сейсмоопасных структур исследуемой территории было проведено ранжирование блоков по степени их неотектонической активности.

Весьма важным вопросом является корректный выбор тектонической основы, поскольку для территории Армении на сегодняшний день можно насчитать около одного десятка схем блокового строения разных масштабов. Во всех этих схемах есть как сходства, так и различия. Более детально эти вопросы проанализированы в работе [Sargsyan, Kazaryan, 2020; Karapetyan et al., 2020].

Данное исследование было построено на схеме детального морфоструктурного районирования территории Армении [Sargsyan, Boinagryan, 2019]. Она отражает все основные линейные и блоковые элементы исследуемой территории, которые имеют четкое отражение в современном рельефе. Блоковая схема, которая была составлена для территории Армении и прилегающих к ней частей Малого Кавказа, представлена на рис. 1.

Кроме выбора морфотектонической основы, важно применить также правильный подход для выделения территории исследования. Как показывает практика, в большинстве из ранее проведенных сейсмологических и сеймотектонических исследований территория исследования выбиралась путем относительного разделения территории Армении на северную, центральную и южную части, или же в некоторых случаях за основу принималось административное деление. Очевидно, что такой подход не может обеспечить должную надежность с позиции геолого-тектонического строения территории.

Именно поэтому авторы настоящей статьи придерживаются геотектонического подхода для выбора территории исследования. Для Армении существуют разные схемы геотектонического районирования, в которых выделены основные геотектонические единицы территории, отличающиеся литолого-фациальными, структурно-формационными характеристиками, а также историей тектонического развития. Среди них наиболее надежной является схема А. Габриеляна [Gabrielyan, 1974], на которой автором выделены пять геотектонических зон: 1) Вирайотц-Карабахская (Сомхето-Кафанская) эвгеосинклинальная мегантиклинорная складчатая зона раннеальпийского (J<sub>1</sub>) заложения на байкальском складчатом основании и мезозойской



**Рис. 1.** Карта неотектонической (неоген-четвертичной) активности и современной сейсмичности блоков Вирайотц-Карабахской зоны.

Номера блоков: 1 – Капанский, 2 – Южно-Карабахский, 3 – Северо-Карабахский, 4 – Центрально-Мравский, 5 – Северо-Мравский, 6 – Мрав-Гугаркский, 7 – Центрально-Гугаркский, 8 – Южно-Гугаркский, 9 – Северо-Гугаркский, 10 – Лалварский, 11 – Вирайотцкий, 12 – Южно-Храмский.

**Fig. 1.** Map of the Viraayots-Karabakh zone showing the neotectonic (Neogene – Quaternary) activity and modern seismicity of blocks. Block numbers: 1 – Kapan, 2 – South Karabakh, 3 – North Karabakh, 4 – Central Mrav, 5 – North Mrav, 6 – Mrav-Gugark, 7 – Central Gugark, 8 – South Gugark, 9 – North Gugark, 10 – Lalvar, 11 – Viraayots, 12 – South Kham.

(киммерийской и ларамийской) складчатости; 2) Севано-Ширакская (Севано-Акеринская) эвгеосинклинальная синклинозная складчатая зона раннеальпийского ( $J_3-K_1$ ) заложения на байкальском складчатом основании и среднеальпийской складчатости; 3) Анкаван-Зангезурская шовная геоантиклинальная зона ранне- и среднеальпийского ( $J_3-K_2$ ) заложения на гетерогенном (байкальском и герцинском) основании и среднеальпийской складчатости; 4) Ереван-Ордубадская миктогеосинклинальная складчатая зона (синклинорий) среднеальпийского ( $K_2$ ) заложения на герцинском основании и позднеальпийской складчатости; 5) Среднеараксинская неогеновая межгорная впадина с гетерогенным (альпийским и герцинским) основанием, которая включает некоторые новейшие вулканические массивы, в частности Арагацкий и Гегамский.

В настоящей статье территорией исследования является Вирайоц-Карабахская геотектоническая зона территории Армении, которая включает также сопредельные части Малого Кавказа. Данная зона и ее границы отчетливо отражаются на ранее упомянутой схеме морфоструктурного районирования, где детально представлено и ее блоковое строение.

## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Еще в середине 70-х гг. прошлого века американский ученый геофизик А.Р. Кларенс в своей работе [Clarence, 1975] отмечал важное значение изучения неоген-четвертичных подвижек для правильного понимания и анализа современной сейсмичности и ее пространственных закономерностей. При этом автор особенно четко отметил важность проведения геоморфологических исследований для решения данной проблемы. Этот подход на сегодняшний день имеет довольно широкое применение при решении разных задач, касающихся сейсмотектоники и палеотектоники, и обеспечивает довольно высокую надежность полученных результатов, что обосновывается многими исследованиями [Imaev et al., 2015; Sim et al., 2017]. С этим утверждением сложно не согласиться, ведь именно неоген-четвертичный период для большинства из современных сейсмоактивных регионов, и для территории Армении в частности, сыграл ключевую роль в процессе формирования ее основных структурно-тектонических черт. Механизмы возникновения многих природных явлений, в том числе и сейсмологических, заложены еще на неотектоническом этапе развития территории.

Исходя из этих убеждений, в настоящей статье прежде всего проведена тектоно-геоморфологическая оценка неотектонической активности блоков. С этой целью были применены следующие тектоно-геоморфологические индексы: индекс соотношения ширины и глубины долины (Valley floor width-valley height Ratio,  $V_F$ ), индекс относительной расширенности склонов (Relative Slope Extension Index,  $RDEt$ ), показатель густоты линейной сети (Lineament Density,  $LD$ ), гипсометрический интеграл (Hypsometry Integral,  $HI$ ), индекс относительной кривизны подножья склона (Mountain Front

Sinuosity,  $Smf$ ), а также индекс тектонической активности (Index of Active Tectonics,  $IAT$ ), который суммирует все вышеперечисленные показатели. Подсчет всех показателей был произведен по методике, представленной в работах [Mahmood, Gloaguen, 2012; Etchebehere et al., 2006; Moussi et al., 2018; Singh et al., 2008; Gentana et al., 2018]. Результаты оценки неотектонической активности для некоторых блоков взяты из ранее проведенной работы [Sargsyan et al., 2019].

Несколько слов о каждом из примененных геоморфологических индексов.

Подсчет индекса соотношения ширины и глубины долины ( $V_F$ ) выполняется по следующей формуле:

$$V_F = \frac{2V_{FW}}{(E_{ld} - E_{sc}) + (E_{rd} - E_{sc})}, \quad (2)$$

где  $V_{FW}$  – ширина дна долины,  $E_{ld}$ ,  $E_{rd}$  и  $E_{sc}$  – абсолютные отметки высот соответственно левостороннего, правостороннего борта и дна долины. Другими словами, эта формула характеризует поперечный профиль долины, который, в зависимости от значения индекса, меняется от V-образного (при  $V_F < 1$ ) к U-образному (при  $V_F > 1$ ). Пример подсчета индекса  $V_F$  приведен на рис. 2. В каждом блоке первым шагом были выделены все главные реки, которые, согласно классификации водотоков Страхлера [Strahler, 1964], являлись водотоками 2-го и более высоких порядков. Следующим шагом были проведены границы водосбора для этих рек, после чего путем поперечного профилирования был подсчитан индекс  $V_F$ . Из всех полученных результатов был синтезирован средний показатель для целого блока.

Индекс относительной расширенности склонов ( $RDEt$ ) подсчитывается следующей формулой:

$$RDEt = (\Delta H / \Delta L) \cdot \ln L, \quad (3)$$

где  $\Delta H$  – падение реки,  $\Delta L$  – длина реки по прямой линии,  $L$  – длина реки по тальвегу. Высокие значения  $RDEt$  характеризуют участки с высокой тектонической активностью, что проявляется в высокой крутизне продольного профиля реки и в ее длине.

Густота линейной сети ( $LD$ ) отражает общую расчлененность территории линейными элементами рельефа, которые преимущественно имеют тектоническое происхождение.

Гипсометрический интеграл ( $HI$ ) является одним из важнейших индексов при оценке тектонической активности территории. Формула подсчета данного индекса представлена ниже:

$$HI = (Elev_{mean} - Elev_{min}) / (Elev_{max} - Elev_{min}), \quad (4)$$

где  $Elev_{mean}$ ,  $Elev_{max}$  и  $Elev_{min}$  – соответственно среднее, максимальное и минимальное абсолютное значение высот территории. Из формулы следует, что, чем выше значение  $HI$ , тем тектонически активнее территория, что выражается большой разностью между максимальным, средним и минимальным значением абсолютных высот.

Индекс относительной кривизны подножья склона ( $S_{mf}$ ) подсчитывается следующей формулой:

$$S_{mf} = L_{mf} / L_s, \tag{5}$$

где  $L_{mf}$  – длина подножья склона,  $L_s$  – длина подножья склона по прямой линии.  $S_{mf}$  не может иметь значение меньше 1, следовательно, чем ближе ее значение к отметке 1, тем интенсивнее наблюдались темпы вертикальных тектонических подвижек.

По каждому тектоно-геоморфологическому показателю была проведена классификация блоков, согласно которой они были разделены на три основные категории: активные, средней активности и пассивные. Конечная классификация была проведена согласно индексу  $IAT$  [Mahmood, Gloaguen, 2012], подсчет которого проводился по следующей формуле:

$$IAT = S / N, \tag{6}$$

где  $S$  – сумма категорий всех ранее примененных индексов,  $N$  – количество примененных индексов. Классификация блоков исследуемой территории по индексу  $IAT$  представлена на рис. 1 и в табл. 1.

В результате анализа было установлено, что на изучаемой территории выделяются три блока с высокой тектонической активностью: Северо-Карабахский, Центрально-Мравский и Вирайюцкий. Блоками со средней активностью выступают Капанский, Южно-Карабахский, Центрально-Гугаркский, Лалварский и Южно-Храмский блоки. Блоками с низкой тектонической активностью являются Северо-Мравский, Мрав-Гугаркский, Южно-Гугаркский и Северно-Гугаркский. Классификация блоков по их тектонической активности является весьма важным звеном в задаче выделения структур,

в которых высока вероятность периодического накопления тектонических напряжений.

Применение исходных сейсмологических данных из каталогов и бюллетеней о зафиксированных землетрясениях на территории Армении также в некотором смысле проблематично. Однако в данном случае это, в первую очередь, связано с неоднородностью этих данных, т.е. те были решены разными системами наблюдений, которые работают разными методами обработки. Детально эти проблемы изложены в работах [Burmin et al., 2016]. Следовательно, для составления более точной картины пространственной сейсмичности исследуемой территории в настоящей работе применены сейсмологические данные за период 1971–2018 гг., взятые из работы [Burmin et al., 2018], в которой была проведена оценка точности исходных сейсмологических данных каталогов и бюллетеней, в результате чего были отфильтрованы данные с высокой точностью, для которых погрешность определения координат очага не превышает 5 км.

На следующем этапе исследования была подсчитана суммарная выделенная энергия землетрясений для каждой блоковой единицы, был произведен подсчет количества наблюдаемых сейсмических событий.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплексный сеймотектонический анализ сводится к сопоставлению трех основных показателей – тектонической активности, выделенной суммарной сейсмической энергии и количества землетрясений. Для

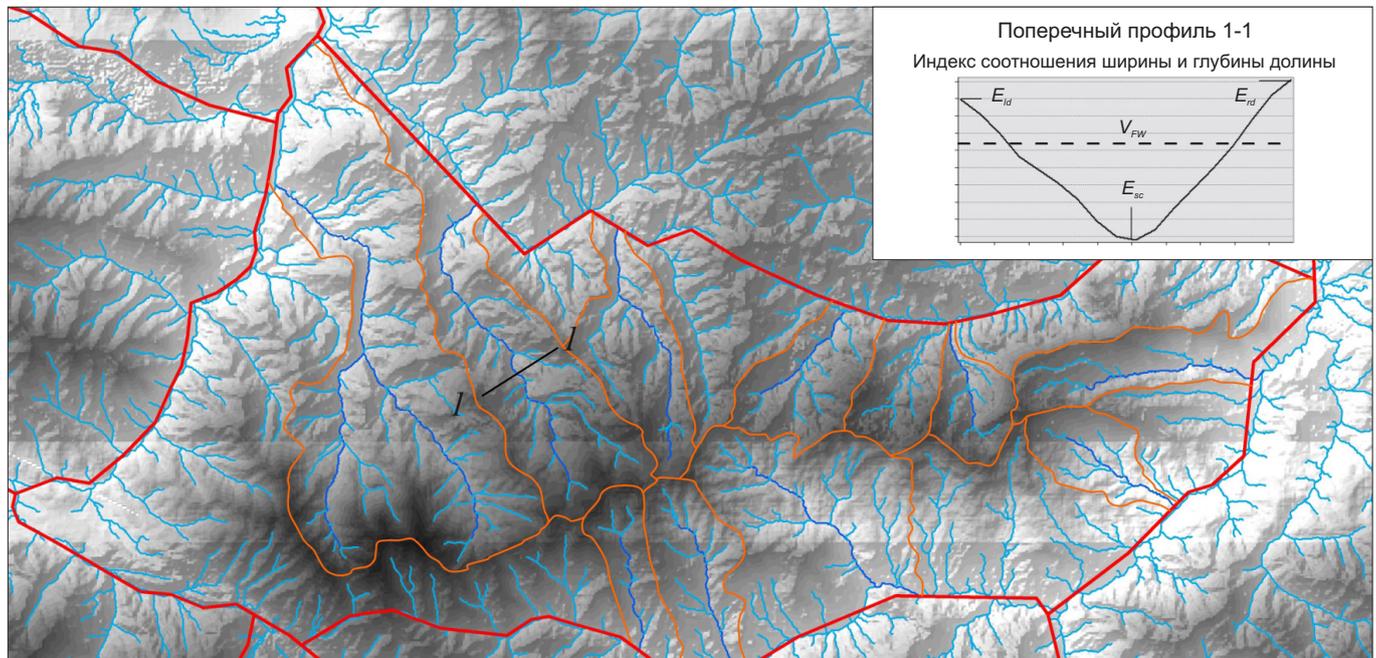


Рис. 2. Пример подсчета индекса  $V_F$ .  
 Fig. 2. Calculation of index  $V_F$ .

Рис. 2. Пример подсчета индекса  $V_F$ .  
 Fig. 2. Calculation of index  $V_F$ .

проведения анализа данных в настоящей работе были широко применены современные ГИС-технологии, в частности программный комплекс ArcGIS 10.5. В результате были составлены карты неотектонической и сейсмической активности Вирайюц-Карабахской зоны (см. рис. 1; рис. 3), а результаты по отдельным блокам приведены в табл. 1 и 2.

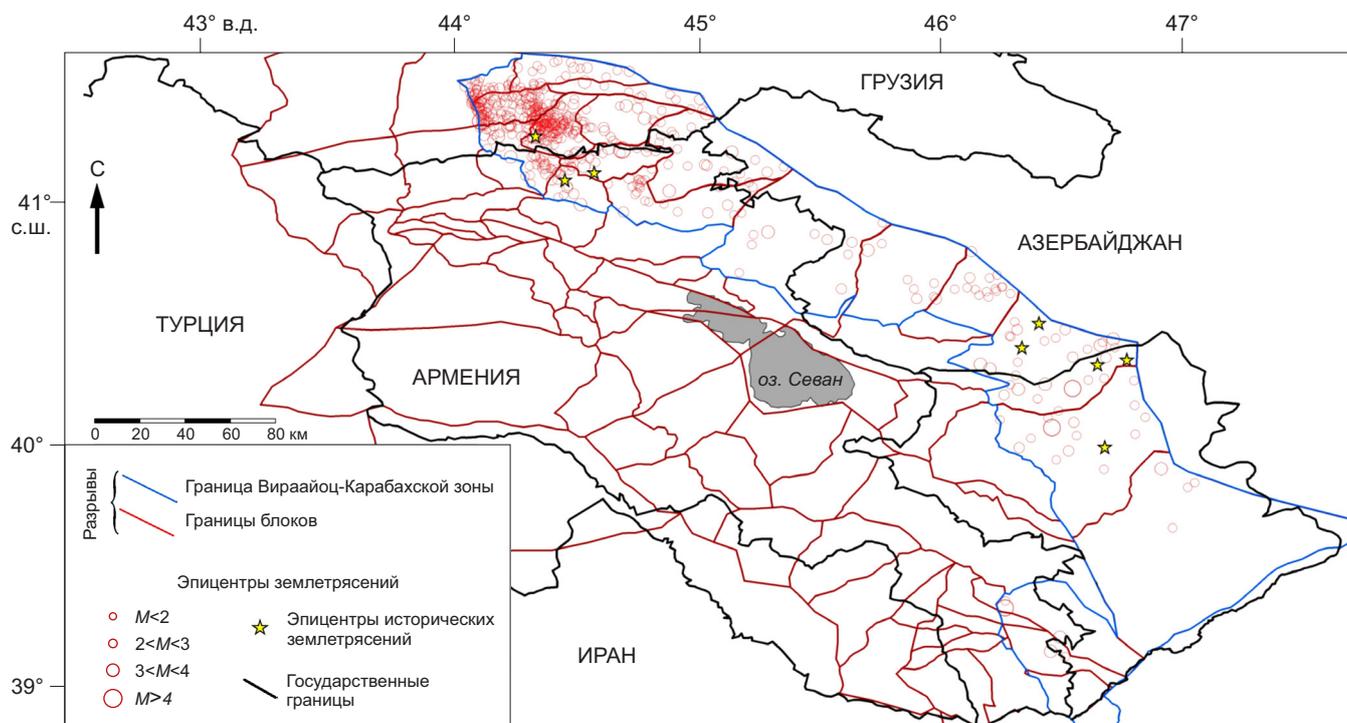
Для составления более понятной картины был построен график, представленный на рис. 4. Из графика видно, что высокими значениями высвобожденной суммарной сейсмической энергии выделяются Северо-Карабахский, Вирайюцкий и Южно-Храмский блоки. Средние значения свойственны Капанскому, Центрально-Мравскому и Лалварскому блокам. Все остальные

**Таблица 1.** Результаты тектоно-геоморфологической оценки неотектонической (неоген-четвертичной) активности блоков  
**Table 1.** Tectonic-geomorphological assessment of the neotectonic (Neogene – Quaternary) activity of the blocks.

Номера и наименования блоков	Класс тектонической активности блока по отдельным тектоно-геоморфологическим показателям					Суммарное значение тектонической активности
	$V_F$	$RDEt$	$L_D$	$HI$	$S_{mf}$	$IAT$
1 Капанский блок	2	2	1	2	2	1.8
2 Южно-Карабахский блок	2	2	2	2	1	1.8
3 Северо-Карабахский блок	2	2	1	1	1	1.4
4 Центрально-Мравский блок	2	1	1	1	2	1.4
5 Северо-Мравский блок	2	2	2	2	2	2.0
6 Мрав-Гугаркский блок	3	2	2	2	2	2.2
7 Центрально-Гугаркский блок	2	1	1	2	2	1.6
8 Южно-Гугаркский блок	2	2	2	2	2	2.0
9 Северо-Гугаркский блок	2	2	2	2	2	2.0
10 Лалварский блок	2	2	2	1	2	1.8
11 Вирайюцкий блок	2	2	1	1	1	1.4
12 Южно-Храмский блок	1	2	2	2	2	1.8

Примечание. Номера в соответствии с картой блоков (см. рис. 1).

Note. Numbers correspond to those in the map (see Fig. 1).



**Рис. 3.** Карта современной сейсмической активности Вирайюц-Карабахской геотектонической зоны.

**Fig. 3.** Modern seismic activity map of the Viraayots-Karabakh geotectonic zone.

блоки характеризуются низкими значениями данного показателя.

Из того же графика можно видеть, что блокам с высокой суммарной сейсмической энергией присуще также большое количество землетрясений, за исключением Северо-Карабахского блока. Если для Вирайюцкого и Южно-Храмского блоков количество землетрясений близко к 200, то для Северо-Карабахского блока количество землетрясений составляет только 14. Следовательно, на каждое произошедшее здесь землетрясение приходится большее количество высвобожденной сейсмической энергии. Примерно такую же картину по данному показателю можно наблюдать по Капанскому блоку.

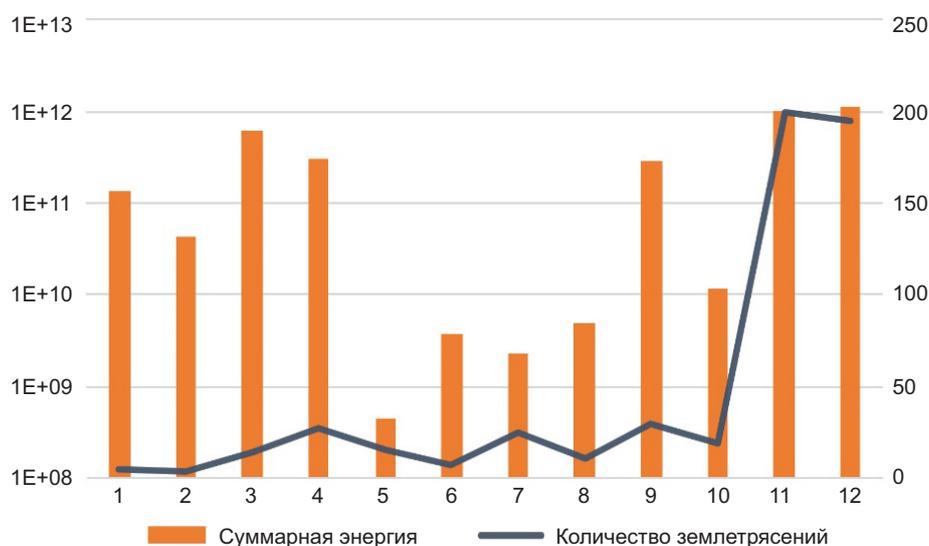
Важно также отметить и максимальные магнитуды произошедших землетрясений. По отдельным блокам мы имеем следующую картину значений  $M_{max}$ : Капанский блок – 3.9, Южно-Карабахский блок – 3.7, Северо-Карабахский блок – 4.3, Центральном-Мравский блок – 4.1, Северо-Мравский блок – 2.3, Мрав-Гугаркский блок – 3.1, Центральном-Гугаркский блок – 2.8, Южно-Гугаркский блок – 2.9, Северо-Гугаркский блок – 3.2, Лалварский блок – 4.1, Вирайюцкий блок – 4.4, Южно-Храмский блок – 4.3. При анализе магнитуд произошедших землетрясений было установлено также, что для Вирайюцкого блока из всех зафиксированных землетрясений только одно имело магнитуду  $M > 4$ , все остальные имеют низкие магнитуды. Аналогичная

**Таблица 2.** Результаты сейсмостатистического анализа для блоков исследуемой территории  
**Table 2.** Statistical analysis of seismic data on the blocks identified in the study area

Номера и наименования блоков	Выделенная суммарная энергия от всех землетрясений за наблюдаемый (1971–2018 гг.) период, Дж	Суммарное количество сейсмических событий за 1971–2018 гг.
1 Капанский блок	1.3181E+11	5
2 Южно-Карабахский блок	4.2661199872	4
3 Северо-Карабахский блок	6.31524E+11	14
4 Центральном-Мравский блок	3.08721E+11	27
5 Северо-Мравский блок	4.56737984	16
6 Мрав-Гугаркский блок	3.654030080	7
7 Центральном-Гугаркский блок	2.282660096	25
8 Южно-Гугаркский блок	4.890319872	11
9 Северо-Гугаркский блок	2.95238E+11	30
10 Лалварский блок	1.1906499584	19
11 Вирайюцкий блок	9.83476E+11	195
12 Южно-Храмский блок	1.11185E+12	199

Примечание. Номера в соответствии с картой блоков (см. рис. 1).

Note. Numbers correspond to those in the map (see Fig. 1).



**Рис. 4.** График высвобожденной суммарной сейсмической энергии и количества сейсмических событий для разных блоков.  
**Fig. 4.** Released total seismic energy vs number of seismic events. Curves for different blocks.

картина была получена также для Южно-Храмского блока. Здесь только три землетрясения имеют магнитуду  $M > 4$ . Из этого следует, что в Вираайоцком и Южно-Храмском блоках высокое значение высвобожденной суммарной сейсмической энергии преимущественно обусловлено частыми землетрясениями с магнитудами до  $M_4$ .

Кроме анализа землетрясений, произошедших за наблюдаемый интервал времени, нами проанализированы также данные об исторических землетрясениях, взятых из работы [Babayan, 2006]. Эти данные также представлены на рис. 3. Они, в свою очередь, свидетельствуют о том, что, например, для Вираайоцкого блока в доинструментальном периоде зафиксировано одно землетрясение с  $M_{4.6}$ , произошедшее в 1917 г. Аналогичным образом два землетрясения с  $M_{4.5}$  произошли в Лалварском блоке в 1903 и 1937 гг.

Боле высокими магнитудами характеризуются Центрально-Мравский и Северо-Карабахский блоки. Для первого установлено четыре исторических события, из которых два крупных с  $M_{7.3}$  и  $M_{5.5}$  соответственно произошли в 1139 и 1867 гг. Два других, а также еще одно сейсмическое событие, зафиксированное в Северо-Карабахском блоке, характеризуются магнитудой средней величины – соответственно  $M_{4.4}$ ,  $M_{4.6}$  и  $M_{4.7}$ .

#### 4. ДИСКУССИЯ

Суммируя результаты проведенного исследования для Вираайоц-Карабахской зоны, можно сделать вывод о том, что данная зона преимущественно характеризуется средней неотектонической активностью, на фоне которой выделяются несколько блоков, где тектоническая активность высокая. Такими являются Северо-Карабахский, Центрально-Мравский и Вираайоцкий блоки, где, судя по проведенному тектоно-геоморфологическому анализу, существуют благоприятные условия для периодического накопления большого количества тектонических напряжений. Анализируя сейсмическую активность этих блоков, мы видим, что здесь имеет место высвобождение большого количества суммарной сейсмической энергии. Однако при рассмотрении данного феномена в контексте с общим числом произошедших здесь землетрясений, с их максимальной и средней магнитудой, а также с данными об исторических землетрясениях можно прийти к выводу, что для возникновения сильных землетрясений с  $M \geq 5$  благоприятные условия имеются лишь в Северо-Карабахском и Центрально-Мравском блоках. В этих двух блоках мы наблюдаем два противоположных процесса – высокую тектоническую активность и низкую сейсмическую активность.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в статье комплексный анализ и полученные результаты могут свидетельствовать об эффективности данного подхода при изучении сеймотектонической активности геологических структур. Анализ неотектонической активности позволяет выделить

блоковые единицы территории, где наиболее вероятно частое накопление большого количества тектонических напряжений, и выявить пассивные структуры. При изучении пространственных закономерностей тектонической активности путем ранжирования блоков на разные категории предоставляется возможность для выявления особых межблоковых тектонических обстановок, что может сыграть ключевую роль при решении задач по обнаружению потенциально опасных разломов и оценке их сеймотектонического потенциала.

#### 6. ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Babayan T.O., 2006. Atlas of Strong Earthquakes of the Republic of Armenia, Artsakh and Adjacent Territories from Historical Times to 2003. Yerevan, 140 p. (in Russian) [Бабаян Т.О. Атлас сильных землетрясений Республики Армения, Арцаха и сопредельных территорий от исторических времен до 2003 г. Ереван, 2006. 140 с.].

Bath M., Duda S.J., 1964. Earthquake Volume, Fault Plan Area, Seismic Energy, Strain, Deformation and Related Quantities. *Annals of Geophysics* 17 (3), 353–368. <https://doi.org/10.4401/ag-5213>.

Burmin V.Yu., Shemeleva I.B., Fleifel L.D., Avetisyan A.M., Kazaryan K.S., 2016. Results of Seismological Data Processing for the Territory of Armenia. *Problems of Engineering Seismology* 43 (1), 29–39 (in Russian) [Бурмин В.Ю., Шемелева И.Б., Флейфель Л.Д., Аветисян А.М., Казарян К.С. Результаты обработки сейсмологических данных для территории Армении // Вопросы инженерной сейсмологии. 2016. Т. 43. № 1. С. 29–39].

Burmin V.Yu., Shemeleva I.B., Fleifel L.D., Avetisyan A.M., Kazaryan K.S., 2018. Spatial Distribution of Crustal Earthquakes in the Caucasus. *Problems of Engineering Seismology* 45 (1), 39–48 (in Russian) [Бурмин В.Ю., Шемелева И.Б., Флейфель Л.Д., Аветисян А.М., Казарян К.С. Пространственное распределение коровых землетрясений Кавказа // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 45. № 1. С. 39–48]. <https://doi.org/10.21455/VIS2018.1-4>.

Clarence R.A., 1975. Geological Criteria for Evaluating Seismicity. *Geological Society of America Bulletin* 86 (8), 1041–1057. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1975\)86%3C1041:GCFES%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1975)86%3C1041:GCFES%3E2.0.CO;2).

Etchebehere M.L.C., Saad A.R., Santoni G.C., Casado F.C., Fulfaro V.J., 2006. Detection of Probable Neotectonic Deformations in the Rio Do Peixe Valley, Western Region of São Paulo, Using RDE (Declivity Extension Ratio) Indices in Drainage Segments. *Geosciences* 25, 271–287.

Gabrielyan A.A., 1974. Geotectonic Zoning of the Territory of the Armenian SSR. *Proceedings of the Armenian SSR Academy of Sciences, Earth Sciences* 4, 3–21 (in Russian) [Габриелян А.А. Геотектоническое районирование территории Армянской ССР // Известия АН АрмССР. Науки о Земле. 1974. № 4. С. 3–21].

Gabrielyan A.A., Piruzyan S.A., 1972. Seismotectonic Schematic Map of Armenia and Adjacent Parts of the Ante-Caucasus. *Bulletin of the Armenian SSR Academy of Sciences, Earth Sciences* 4, 24–33 (in Russian) [Габриелян А.А., Пирюзян С.А. Сеймотектоническая схема Армении и сопредельных

частей Антикавказа // Известия АН АрмССР. Науки о Земле. 1972. № 4. С. 24–33].

Gasparyan G.S., Oganessian A.O., Sargsyan R.S., 2019. About the Level of Seismotectonic Potential of the Anatolia–Caucasus–Iran Area of the Mediterranean–Pacific Belt. In: Problems of Tectonics of Continents and Oceans. Proceedings of the LI Tectonic Meeting (January 29 – February 02, 2019). Vol. 1. GEOS, Moscow, p. 135–140 (in Russian) [Гаспарян Г.С., Оганесян А.О., Саргсян Р.С. Об уровне сейсмотектонического потенциала Анатолийско-Кавказско-Иранского региона Средиземноморско-Тихоокеанского пояса // Проблемы тектоники континентов и океанов: Материалы LI тектонического совещания (29 января – 02 февраля 2019 г.). Т. 1. М.: ГЕОС, 2019. С. 135–140].

Gentana D., Sulaksana N., Sukiyah E., Yuningsih E., 2018. Index of Active Tectonic Assessment: Quantitative-Based Geomorphometric and Morphotectonic Analysis at Way Belu Drainage Basin, Lampung Province, Indonesia. International Journal of Advanced Science Engineering Information Technology 8 (6), 2460–2471.

Ghazaryan K.S., Sargsyan R.S., 2020. General Regularities of Seismic Activity of Northern Armenia in Connection with Block Structure and Tectonic Activity. Geodynamics & Tectonophysics 11 (3), 595–605 (in Russian) [Казарян К.С., Саргсян Р.С. Общие закономерности сейсмической активности северной Армении в связи с блоковым строением и тектонической активностью территории // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 3. С. 595–605]. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0493>.

Imaev V.S., Imaeva L.P., Smekalin O.P., Koz'min B.M., Grib N.N., Chipizubov A.V., 2015. A Seismotectonic Map of Eastern Siberia. Geodynamics & Tectonophysics 6 (3), 275–287 (in Russian) [Имаев В.С., Имаева Л.П., Смекалин О.П., Козьмин Б.М., Гриб Н.Н., Чипизубов А.В. Карта сейсмотектоники Восточной Сибири // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 3. С. 275–287]. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-3-0182>.

Karapetyan J.K., Sargsyan R.S., Kazaryan K.S., Dzernov V.V., Dzeboev B.A., Karapetyan R.K., 2020. Current State of Exploration and Actual Problems of Tectonics, Seismology and Seismotectonics of Armenia. Russian Journal of Earth Sciences 20, ES2005. <https://doi.org/10.2205/2020ES000709>.

Mahmood S., Gloaguen R., 2012. Appraisal of Active Tectonics in Hindu Kush: Insights from DEM Derived Geomorphic Indices and Drainage Analysis. Geoscience Frontiers 3 (4), 407–428. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.12.002>.

Moussi A., Rebai N., Chaieb A., Saadi A., 2018. GIS-Based Analysis of the Stream Length-Gradient Index for Evaluating Effects of Active Tectonics: A Case Study of Enfidha (North-East of Tunisia). Arabian Journal of Geosciences 11, 123. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3466-x>.

Oganessian S.M., Oganessian A.O., Geodakyan E.G., Gasparyan G.S., 2008. Identification of Earthquake Focal Zones Based on Seismological Identification and Parameterization of the Main Elements of the Structural-Dynamic Model of the

Crust in Armenia. Proceedings of NAS RA. Earth Sciences XLI (1), 39–43 (in Russian) [Оганесян С.М., Оганесян А.О., Геодакян Э.Г., Гаспарян Г.С. Выделение зон возникновение очагов землетрясений на основе сейсмологической идентификации и параметризации основных элементов структурно-динамической модели земной коры Армении // Известия НАН РА. Науки о Земле. 2008. Т. XLI. № 1. С. 39–43].

Sargsyan R.S., Boinagryan V.R., 2019. Morphostructural Zoning Scheme for the Territory of the Republic of Armenia. Proceedings of the YSU. Geology and Geography 53 (3), 179–184 (in Russian) [Саргсян Р.С., Бойнагрян В.Р. Схема морфоструктурного районирования территории РА // Ученые записки ЕГУ. Геология и география. 2019. Т. 53. № 3. С. 179–184].

Sargsyan R.S., Boinagryan V.R., Chartaryan E.A., 2019. Tectonic-Geomorphological Analysis of Morphostructural Units of the Northern Folded Zone in Armenia for Assessment of Tectonic Activity. Scientific Papers of Shirak State University. Vol. A (1). P. 87–100 (in Russian) [Саргсян Р.С., Бойнагрян В.Р., Чартарян Э.А. Тектоно-геоморфологический анализ морфоструктурных единиц северной складчатой зоны Армении с целью оценки тектонической активности // Ученые записки ШГУ. 2019. Вып. А. № 1. С. 87–100].

Sargsyan R.S., Kazaryan K.S., 2020. Current State and Ways for Solving Problems of Identification of Strong Earthquake Focal Zones and Assessment of Seismotectonic Potential of the Territory of Armenia. In: Fundamental Problems of Tectonics and Geodynamics. Proceedings of the LII Tectonic Meeting (January 28 – February 01, 2020). Vol. 2. GEOS, Moscow, p. 281–286 (in Russian) [Саргсян Р.С., Казарян К.С. Современное состояние и пути решения задач по выделению очаговых зон сильных землетрясений и оценки сейсмотектонического потенциала территории Армении // Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики: Материалы LII тектонического совещания (28 января – 01 февраля 2020 г.). М.: ГЕОС, 2020. Т. 2. С. 281–286].

Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V., Savvichev P.A., 2017. Neotectonics and Tectonic Stresses of the Sakhalin Island. Geodynamics & Tectonophysics 8 (1), 81–202 (in Russian) [Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А. Неотектоника и тектонические напряжения острова Сахалин // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 1. С. 81–202]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237>.

Singh O., Sarangi A., Milap C., 2008. Hypsometric Integral Estimation Methods and its Relevance on Erosion Status of North-Western Lesser Himalayan Watersheds. Water Resources Management 22, 1545–1560. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9242-z>.

Strahler A., 1964. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. In: V.T. Chow (Ed.), Handbook of Applied Hydrology. New York, 39–76.