

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 551.24

DOI: [10.46698/VNC.2021.71.60.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.71.60.004)

Оригинальная статья

Оценка сейсмотектонического потенциала
блоков Восточного КавказаР.А. Магомедов , М.А. Мусаев 

Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН,
Россия, 367030, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Ярагского, 75, e-mail:
ra-mag@yandex.ru

Статья поступила: 28.10.2021, доработана: 29.11.2021, одобрена в печать: 02.12.2021

Резюме: Актуальность работы. Восточный Кавказ является самым сейсмоактивным регионом европейской части России, в сферу повышенных сейсмических воздействий которого попадают крупные энергетические объекты Сулакского каскада ГЭС, высоковольтные линии электропередач, основные транспортные коммуникации, нефте- и газопроводы федерального и республиканского значения, аэро- и морской порты и крупные, разросшиеся города и поселки региона. Отсутствие исследований по проблеме оценки сейсмотектонической и геотектонической ситуации значительно ослабляет готовность региона к предупреждению обширных экологических и техногенных катастроф. Современные сейсмически активные зоны Восточного Кавказа в условиях позднеальпийского тектогенеза характеризуются иными геодинамическими и сейсмотектоническими условиями по сравнению с герцинской и киммерийской. Альпийский этап тектогенеза характеризуется значительным максимумом своей активизации, с которым связаны современные геодинамические и сейсмотектонические процессы и повышенная современная сейсмическая активность региона. Уровень сейсмотектонического потенциала, как сейсмического и геодинамического, является важнейшим показателем оценки степени сейсмической опасности. **Цель исследования.** Оценка уровня сейсмотектонического потенциала блоков земной коры северо-восточного сегмента Восточного Кавказа и выделение потенциальных зон ожидания возможных очагов сильных землетрясений региона (ВОЗ). **Методы исследования.** Анализ пространственно-временного распределения сейсмичности за инструментальный период наблюдений и экспертная оценка сейсмотектонического потенциала блоков земной коры по комплексу сейсмологических показателей, таких как мощность сейсмоактивного слоя, сейсмическая активность и наклон графика повторяемости землетрясений, максимальная отмеченная (наблюденная) магнитуда, период последней активизации и тектоническая активность. **Результаты исследования.** Закартировано в условных единицах изменение сейсмотектонического потенциала на исследуемой территории. Составлена схема зон возможных очагов землетрясений региона. Распределение гипоцентров сильных землетрясений демонстрирует расслоенность геологической среды региона. В интервале глубин, в среднем от 33 до 42 км, выделяется так называемая «зона молчания».

Ключевые слова: региональная геотектоника, сейсмотектонический потенциал, геодинамика, современная сейсмичность, сейсмическая активность, палеосейсмичность, очаг землетрясения, зона ВОЗ.

Для цитирования: Магомедов Р.А., Мусаев М.А. Оценка сейсмотектонического потенциала блоков Восточного Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11(4): 43-57. DOI: 10.46698/VNC.2021.71.60.004.

[DOI: 10.46698/VNC.2021.71.60.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.71.60.004)

Original paper

Assessment of the seismotectonic potential of the East Caucasus blocks

R.A. Magomedov , M.A. Musaev 

Institute of Geology, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy
of Sciences, Russia, 367030, Republic of Dagestan, Makhachkala, Yaragskogo str., 75,
e-mail: ra-mag@yandex.ru

Received: 28.10.2021, revised: 29.11.2021, accepted: 02.12.2021

Abstract: Relevance. The Eastern Caucasus is the most seismically active region of the European part of Russia, where large energy facilities of the Sulak cascade of hydroelectric power plants, high-voltage power lines, main transport communications, oil and gas pipelines of federal and republican significance, air and sea ports and large, sprawling cities and towns of the region fall into the sphere of increased seismic impacts. The lack of research on the problem of assessing the seismotectonic and geotectonic situation can lead to undesirable environmental consequences. Modern seismically active zones of the Eastern Caucasus in the conditions of Late Alpine tectogenesis are characterized by different geodynamic and seismotectonic conditions compared to the Hercynian and Cimmerian. The Alpine stage of tectogenesis is characterized by a significant maximum of its activation, which is associated with modern geodynamic and seismotectonic processes and increased modern seismic activity of the region. The level of seismotectonic potential, both seismic and geodynamic, is the most important indicator of assessing the degree of seismic danger. **Aim.** Assessment of the level of the seismotectonic potential of the crustal blocks of the north-eastern segment of the Eastern Caucasus and identification of potential waiting zones for possible foci of strong earthquakes in the region (PFE). **Methods.** Analysis of the spatiotemporal distribution of seismicity over the instrumental observation period and expert assessment of the seismotectonic potential of the Earth's crust blocks according to a set of seismological indicators, such as the power of the seismoactive layer, seismic activity and the slope of the earthquake recurrence graph, the maximum marked (observed) magnitude, the period of the last activation and tectonic activity. **Results.** The change in the seismotectonic potential in the studied territory is mapped in conventional units. A diagram of the zones of possible earthquake foci in the region has been compiled. The distribution of hypocenters of strong earthquakes demonstrates the stratification of the geological environment of the region. In the depth range, on average from 33 to 42 km, the so-called "zone of silence" is allocated.

Keywords: regional geotectonics, seismotectonic potential, geodynamics, modern seismicity, seismic activity, paleoseismicity, earthquake focus, PFE zone.

For citation: Magomedov R.A., Musaev M.A. Assessment of the seismotectonic potential of the East Caucasus blocks. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11(4): 43-57. DOI: 10.46698/VNC.2021.71.60.004.

Введение

В науках о Земле общепринятых терминов «геодинамический потенциал» и «сеймотектонический потенциал» к настоящему времени нет. Терминологическая неопределенность характерна и для других направлений наук [Леонов, 2011]. Она серьезно осложняет работу исследователей и вносит большие издержки при исследовании научных проблем. Каждый исследователь вкладывает свой смысл в эти понятия. Мазур И.И. и Молдованов О.И. [Мазур и др., 1996] дают следующее определение геодинамического потенциала: «*Геодинамический потенциал геологической*

среды – вероятностный параметр, определяющий возможность возникновения и развития того или иного деградиционного процесса или их совокупности, которые могут произойти в случае нарушения под воздействием человека целостности земной коры или её почвенно-растительного слоя, изменения гидрологического режима рек и т.д.».

Данное определение, как нам представляется, не дает полной характеристики потенциальной энергии, заключенной в конкретной структуре геосреды.

Поскольку геодинамический потенциал характеризует энергию среды (энергетический показатель), под «*геодинамическим потенциалом*» конкретной структуры геосреды нами подразумевается вся энергия, заключенная в ней не только на атомарном (вещественном) уровне, но и запасенная геотектоническая (генетически обретенная в процессе длительного литогенеза и в процессе истории его геологического развития), а также – накопленная в результате современных геодинамических и геотектонических процессов. Каждый блок земной коры имеет свой уровень геодинамического потенциала, зависящий от литолого-структурного строения, вещественного состава, геолого-геофизических условий и истории его геологического развития. Запасенная потенциальная энергия может вырваться в зависимости от разных причин: от снятия литостатического давления в результате экзогенных геологических процессов (эрозия, размыв и т.д.) с «расконсервацией» генетически обретенных и накопленных в современный период геонапряжений; в результате тектонических подвижек; физико-химических процессов в самой геологической среде (фазовых переходов в минералах на большой глубине при больших р-Т-условиях со скачкообразным изменением упругих и прочностных характеристик и т.д.). Чем больше размер блока, тем больше и заключенная в нем энергия. Однако, при оценке потенциальной тектонической энергии в любом регионе, следует учитывать, что раздробленная (дезинтегрированная) геологическая среда в межблоковых зонах, в условиях постоянного тектонического стресса, не может копить энергию выше энергии на пределе прочности горной породы цельного блока. Эта энергия будет расходоваться (в виде слабых сейсмических событий и тектонического крипа) в процессе ее накопления, не доходя до уровня на пределе прочности горной породы цельного блока.

Есть определение *сейсмического потенциала* [Рейснер, Рогожин, 2002] под которым понимается максимальная энергия, которую способны выделять землетрясения, уже произошедшие или ожидаемые в будущем в пределах того или иного участка земной коры. Эту характеристику авторы [Рейснер, Рогожин, 2002] предлагают оценивать в единицах магнитуды и, выдвигается универсальная методика выявления M_{max} для территории практически любого тектонического строения, обеспеченного необходимыми исходными геолого-геофизическими данными. Более того, они предлагают прогнозирование сейсмического потенциала в разных масштабах – на локальном, региональном, континентальном и любом промежуточном между ними уровнях. Оно реализуется на базе разработанного в Институте физики Земли РАН внерегионального сеймотектонического метода [Рейснер и др., 1998]. Он представляет собой разновидность метода аналогий, в соответствии с которым предполагается, что одинаковые геолого-геофизические условия в земной коре могут характеризоваться одинаковым уровнем потенциальной максимальной сейсмической энергии (M_{max}). Однако, следует учитывать, что степень изученности разных регионов к настоящему времени, не одинаковая

[Заалишвили и др., 2011; Imaeva et al., 2017; Bornyakov et al., 2012; McClusky et al., 2000; Zaalishvili, Rogozhin, 2011; Чотчаев и др., 2020] и, в качестве исходных данных использованы признаки, характеризующие современное строение и состояние земной коры и не учитывается запасенная геотектоническая (генетически обретенная в процессе длительного литогенеза и в процессе истории его геологического развития) энергия. Естественно, для характеристики сейсмического процесса в земной коре набор исходных данных о современном строении и состоянии земной коры является исчерпывающим, поскольку многие другие параметры невозможно использовать из-за их неполноты.

В настоящей работе сделана попытка оценки «сейсмотектонического потенциала» блоков Восточного Кавказа, на наш взгляд, в наибольшей степени, характеризующего его содержание. Уровень сейсмотектонического потенциала, как сейсмического и геодинамического, является важнейшим показателем оценки степени сейсмической опасности.

Материал и методы исследования

Ранее [Магомедов, 2021; Magomedov, 2021], оценка геодинамического потенциала блоков Восточного Кавказа нами проводилась, в основном, по геологическим критериям, таким как мощность земной коры, протяженность дизъюнктивных зон фундамента и осадочного чехла, наличие признаков палеосейсмичности и тектоническая активность. В данной работе оценка сейсмотектонического потенциала проведена на основе сейсмологических критериев: мощности сейсмоактивного слоя (h_s), сейсмической активности (A_{10}) и наклоне графика повторяемости землетрясений, максимальной отмеченной (наблюденной) магнитуде (M_{max}), периоде последней активизации (τ) и тектонической активности (a_i). К оценке величины сейсмотектонического потенциала привлечены все те данные, которые, как нам представляется, ответственны за накопление сейсмической энергии в земной коре. Уровень сейсмотектонического потенциала устанавливается по комплексу вышеприведенных показателей. Каждый показатель градуирован с условным весом, определенным экспертным путем (от 0 до 1) и учтен в суммарной оценке. Приведенный набор показателей является, как нам представляется, практически исчерпывающим на сегодняшний день, поскольку многие другие показатели (в частности, количественные характеристики тангенциальных тектонических напряжений, согласно существующей схеме разломно-блоковой структуры региона; скорость их современных движений; литолого-стратиграфическая характеристика с вещественным составом и определением предела прочности горных пород в конкретных геолого-геофизических условиях и т.д.) невозможно использовать из-за их неполноты. Правда, в последние годы предприняты попытки оценки «геодинамического потенциала» геологической структуры с учетом энергии, заключенной в ней на вещественном уровне [Тишкин, 2006]. Однако эта тема, в настоящее время остается дискуссионной.

Таким образом, сейсмотектонический потенциал (S_p) блоков Восточного Кавказа представляется как функция, зависящая от вышеприведенных показателей:

$$S_p = f(h_s, A_{10}, M_{max}, \tau, a_i) \quad (1)$$

При оценке сейсмотектонического потенциала приняты допущения:

1. Вертикальные и горизонтальные размеры блоков примерно одинаковые.

2. Блоки, на данный момент, изучены примерно с одинаковой полнотой.

Сеймотектонический потенциал блока является величиной непостоянной в исторической и геологической перспективе.

В результате проведенных исследований удалось закартировать в условных единицах изменение сеймотектонического потенциала на исследуемой территории. Наложив карту разломно-блоковой тектоники региона на карту сеймотектонического и геодинамического потенциалов, можно проградировать предварительно выделенные квазиоднородные блоки и линеаменты региона, используя зарегистрированную и известную уже сейсмичность. Таким способом получается карта прогнозных зон возникновения землетрясений (ВОЗ). Обоснование размера, ориентировки блоков (рис. 1) и выбор представительной магнитуды для региона приводятся в наших исследованиях, посвященных геодинамическому потенциалу блоков Восточного Кавказа [Magomedov, 2021].

Результаты работы и их обсуждение

Мощность сейсмоактивного слоя (h_s). Распределение гипоцентров землетрясений по глубинам является важной характеристикой сейсмического режима региона. Оно дает сведения о сейсмоактивном слое и его глубине залегания. Для целей нашей работы показатель «мощность сейсмоактивного слоя» градуирован с условным весом от 0 до 1: максимальной мощности ($h = 54$ км) сейсмоактивного слоя присвоена – 1; при отсутствии очага в блоке – 0; при 0,5 h (27 ± 5 км) – 0,5; при 0,75 h (40 ± 5 км) – 0,8; при 0,25 h (13 ± 2 км) – 0,3; менее 0,12 h (≤ 10 км) – 0,1. Результаты градуировки приведены в таблице 1.

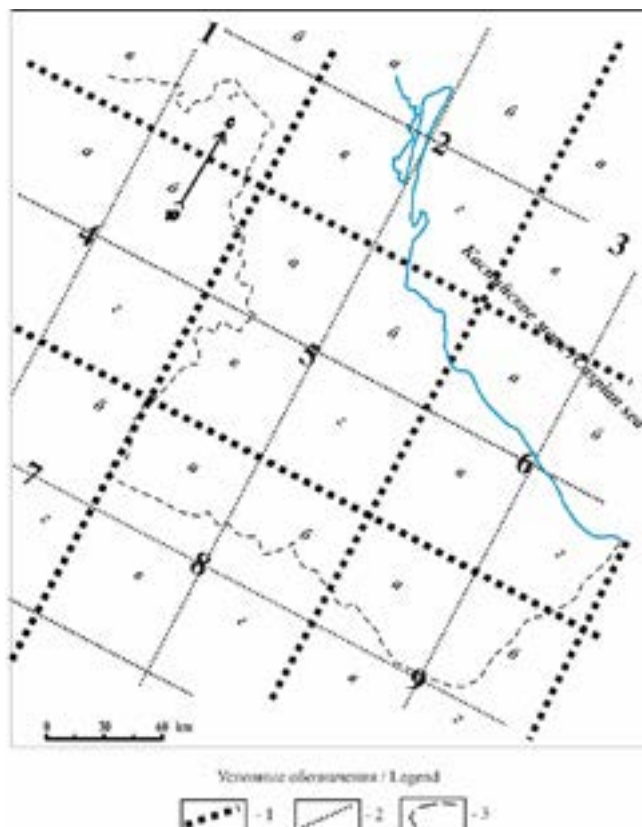


Рис. 1. Квазиоднородные блоки земной коры в северо-восточном сегменте Восточного Кавказа [Magomedov, 2021]

1 – границы блоков местного порядка (в середине блока – его номер). 2 – границы блоков наименьшего порядка (в середине блока – его буквенное обозначение). 3 – граница республики.

Fig. 1. Quasi-homogeneous blocks of the Earth's crust in the north-eastern segment of the Eastern Caucasus [Magomedov, 2021].

1 – the boundaries of the local order blocks (in the middle of the block – its number). 2 – the boundaries of the blocks of the smallest order (in the middle of the block – its letter designation). 3 – the border of the republic.

Таблица 1 / Table 1

**Оценка условного веса геодинамических блоков по мощности
сейсмоактивного слоя /
Estimation of the conditional weight of geodynamic blocks by the thickness
of the seismoactive layer**

Геодинамические блоки / Geodynamic blocks		Мощность сейсмоактивного слоя, h (км) / Thickness of the seismoactive layer	Условная единица / Conventional unit
1	<i>a</i>	0	0
	<i>б</i>	0	0
	<i>в</i>	0	0
	<i>г</i>	0	0
2	<i>a</i>	0	0
	<i>б</i>	0	0
	<i>в</i>	0	0
	<i>г</i>	5	0,1
3	<i>a</i>	0	0
	<i>б</i>	0	0
	<i>в</i>	5	0,1
	<i>г</i>	5	0,1
4	<i>a</i>	5	0,1
	<i>б</i>	22	0,5
	<i>в</i>	10	0,1
	<i>г</i>	15	0,3
5	<i>a</i>	54	1
	<i>б</i>	12	0,3
	<i>в</i>	8	0,1
	<i>г</i>	53	1
6	<i>a</i>	23	0,5
	<i>б</i>	35	0,8
	<i>в</i>	17	0,3
	<i>г</i>	37	0,8
7	<i>a</i>	0	0
	<i>б</i>	0	0
	<i>в</i>	0	0
	<i>г</i>	0	0
8	<i>a</i>	40	0,8
	<i>б</i>	15	0,3
	<i>в</i>	18	0,3
	<i>г</i>	5	0,1
9	<i>a</i>	0	0
	<i>б</i>	10	0,1
	<i>в</i>	5	0,1
	<i>г</i>	10	0,1

Примечание: мощность сейсмоактивного слоя в блоке с одиночным и на одинаковом уровне очагами принимается за 5 км. При анализе использованы сейсмические события с M более 4.6. /
Note: the power of the seismically active layer in a block with single and at the same level foci is taken as 5 km. The analysis uses seismic events with a M greater than 4.6.

Сейсмическая активность (A_{10}). Для вычисления A_{10} использовались вышеупомянутые каталоги землетрясений за период 1970–2020 гг. Рассмотренный каталог землетрясений характеризуется уровнем представительности энергетического класса $K_{\min} = 7$ за последние десять лет и $K_{\min} = 8$ – за более ранние десятилетия.

На территории исследуемого района за указанный период зарегистрировано порядка 11200 землетрясений с энергетическим классом $K \geq 8$, из них 189 – сильных землетрясений с классом $K \geq 12$ и 608 – с $K \geq 11$. Перед вычислением сейсмической активности использованный каталог землетрясений был очищен от афтершоков. Выделение афтершоков из каталога осуществлялось с использованием компьютерной программы AftIdent, составленной и любезно предоставленной нам д. ф.-м. н., заведующим кафедрой физики Земли физического факультета МГУ В.Б. Смирновым.

Для построения карты сейсмической активности A_{10} исследуемая территория была разбита на равные прямоугольные площадки размером $0,4^\circ$ по широте и $0,6^\circ$ по долготе (размеры площадки примерно $45'50$ км). Значение сейсмической активности A_{10} вычислялось по известной формуле [Арефьев и др., 1980; Бунэ, 1965; Бунэ и др., 1960; Мусаев, 2020; Ризниченко, 1979]:

$$A_{10} = \frac{S_0 \cdot T_0}{S \cdot T} \cdot \frac{\sum_{K_{\min}}^{K_{\max}} 10^{\gamma(K-10)} \cdot N_K}{K_{\max} - K_{\min} + 1} \quad (2)$$

где γ – наклон графика повторяемости (в нашем случае: $\gamma = 0,51$); S_0 – единица нормирования по площади ($S_0 = 1000$ км²); T_0 – единица времени ($T_0 = 1$ год); S – площадь выбранных площадок (в нашем случае: $S = 2250$ км²); T – период наблюдения землетрясений (в нашем случае: $T = 51$ год).

Для каждой площадки находилось N_K – число землетрясений энергетического класса K , где $K = \lg E$, (E – энергия землетрясения в Дж), произошедших на этой площадке за период наблюдения и проводилось суммирование от минимального энергетического класса K_{\min} до максимального K_{\max} по формуле (2). Расчет карты сейсмической активности по формуле (2) проводился с помощью программы, разработанной нами на Delphi. Вычисленное значение A_{10} приписывалось центру вышеуказанных площадок. Для определения значений сейсмической активности каждого блока региона произведено наложение и совмещение построенной карты A_{10} со схемой геодинамических блоков (рис. 2).

На полученной, таким образом, схеме видно, что наиболее сейсмически активная зона расположена в центральной части исследуемой территории, где значение активности достигает $A_{10} = 1,96$. Переход A_{10} к условным единицам (от **0** до **1**) произведено экспертным путем: максимальному значению A_{10} (1,96) присвоена – **1**; минимальному значению и при отсутствии информации по блоку – **0**; при значении A_{10} в блоках от 0,50 до 1,00 – **0,7**; при значении от 0,36 до 0,49 – **0,5**; при значении от 0,02 до 0,35 – **0,3**. Результаты перевода A_{10} в условные единицы приведены в таблице суммарной оценки сеймотектонического потенциала (табл. 3).

Максимальная отмеченная (наблюденная) магнитуда (M_{\max}) определена по результатам анализа общего каталога землетрясений ЕГС РАН и ее Дагестанского отделения. Максимальный условный вес придан сейсмическому событию в блоке с М

$\geq 6,6 - 1$, с $M = 6-6,5 - 0,9$, $M = 5,5-5,9 - 0,8$, $M = 4,5-5,4 - 0,7$, $M = 3,8-4,4 - 0,5$, $M < 3,8 - 0,1$. Результаты оценки приведены в таблице 3.

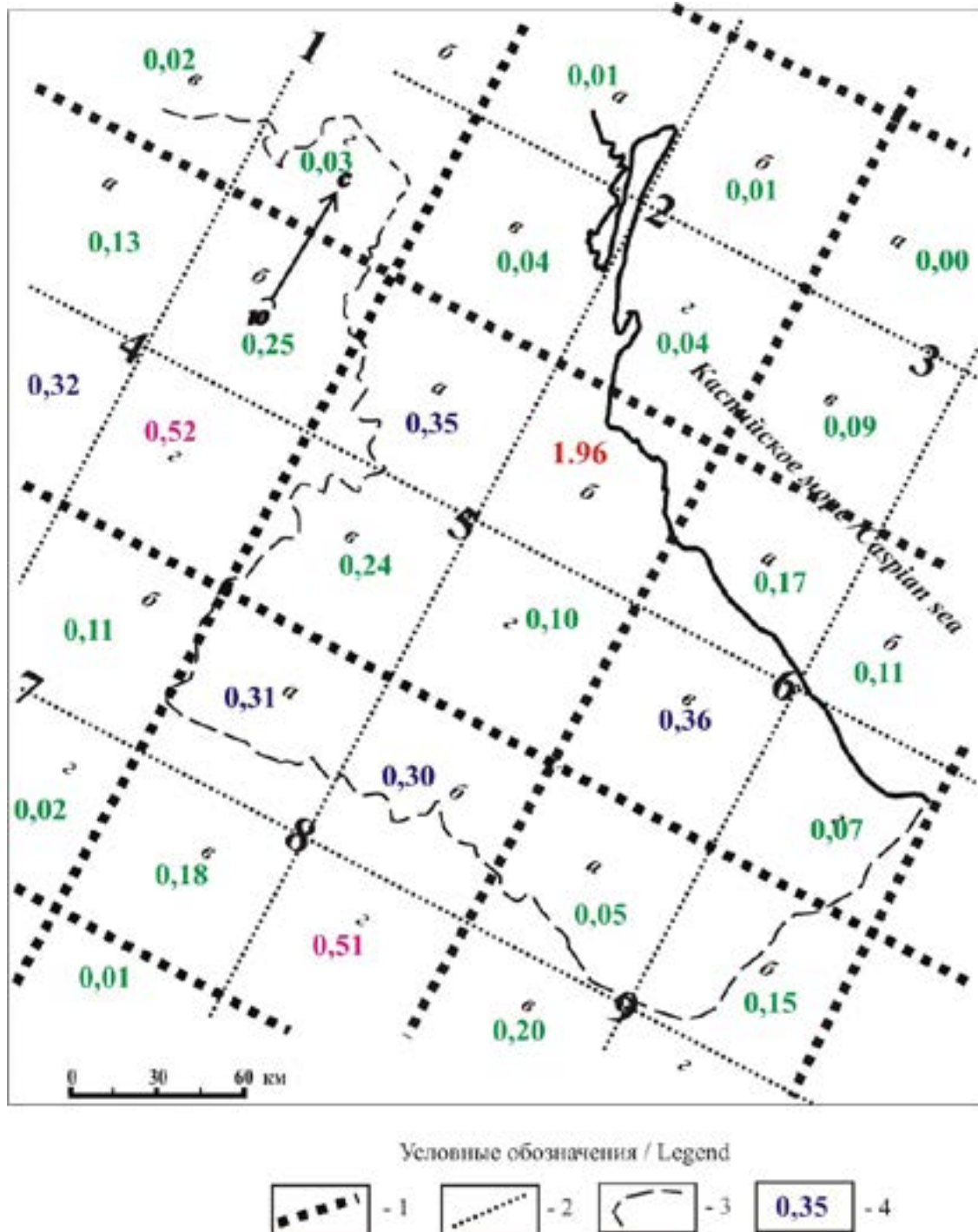


Рис. 2. Карта сейсмической активности (A_{10}) блоков С-В сегмента Восточного Кавказа.
 1 – границы блоков местного порядка (в середине блока – его номер). 2 – границы блоков наименьшего порядка (в середине блока – его буквенное обозначение). 3 – граница республики. 4 – сейсмическая активность /

Fig. 2. Map of seismic activity (A_{10}) of blocks N-E of the Eastern Caucasus segment.
 1 – the boundaries of the local order blocks (in the middle of the block – its number). 2 – the boundaries of the blocks of the smallest order (in the middle of the block – its letter designation). 3 – the border of the republic. 4 – seismic activity

Период последней активизации (τ) определялся по каталогу исторических землетрясений. Макросейсмические данные о сильных землетрясениях Дагестана имеются с VII века нашей эры [Левкович и др., 1977]. В доинструментальный период (VII-XIX вв.) имеются сведения о 18 землетрясениях, весьма существенно отличающихся по своей информативности. Оценка условного веса по периоду последней активизации (по результатам анализа каталога исторических землетрясений) приведена в таблице 3. Максимальная условная единица – 1 придана сильному сейсмическому событию в блоке XVIII-XIX вв., XVII века – 0,5, с VII по XIII вв. – по 0,1.

Тектоническая активность (a_t). Оценка тектонической активности блоков в неогеновый и четвертичный периоды геологического развития производился также в условных единицах. Для целей определения сейсмотектонического потенциала блоков и определения потенциальных зон ВОЗ современная и историческая активность имеет наибольшее значение и условный вес по сравнению с общей четвертичной и новейшей активностью (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

*Тектоническая активность блоков различных порядков в неотектонический и четвертичный периоды геологического развития /
Tectonic activity of blocks of various orders in the neotectonic and Quaternary periods of geological development*

Четвертичный период / Quaternary period	Современная активность (последние 100 лет) / Modern activity (last 100 years)	1 (макс.)
	Историческая активность (от 100 до 6000 лет) / Historical activity (from 100 to 6000 years)	0,7
	Четвертичная активность (до 1,8 млн лет) / Quaternary activity (up to 1.8 Ma)	0,2
Неогеновый период / Neogene Period	Новейшая активность (последние 25–35 млн лет) / Recent activity (last 25-35 million years)	0,1

Анализ современной активности показывает, что за последние 100 лет самым активным являлся блок 5б, которому присвоена и максимальное значение – 1.

Исторически активным блокам присвоены по 0,7 условных единиц. Наиболее исторически сейсмоактивными оказались блоки 5(а) и 6(з), где произошли сильные сейсмические события с магнитудами от 5 и выше.

Четвертичная и новейшая активность подтверждается многими авторитетными геологами и не подлежит сомнению. Всем остальным блокам Восточного Кавказа присвоены по 0,2+0,1 условных единиц.

Суммарная оценка сейсмотектонического потенциала показала что, наибольший условный вес имеют блоки – 5(а,б), 6в, 8а и 9б (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Суммарная оценка сеймотектонического потенциала блоков С-В сегмента Восточного Кавказа (в условных единицах) /
 Summary assessment of the seismotectonic potential of blocks N-E of the Eastern Caucasus segment (in conventional units)

Геодинамические блоки / Geodynamic blocks	Показатели сеймотектонического потенциала / Indicators of the seismotectonic potential						Суммарная оценка, усл. ед. / Total assessment, conventional units
	Мощность сейсмоактивного слоя, h / Thickness of the seismically active layer	Сейсмическая активность, A_{10} / Seismic activity	Максимальная отмеченная (наблюденная) магнитуда (M) / Maximum noted (observed) magnitude	Период последней активизации (τ) / Period of last activation	Тектоническая активность (a_t) / Tectonic activity		
1	<i>a</i>	0	0	0	0	0.2 + 0.1	0.3
	<i>б</i>	0	0	0	0	0.2 + 0.1	0.3
	<i>в</i>	0	0.3	0.7	0	0.2 + 0.1	1.3
	<i>г</i>	0	0.3	0.7	0	0.2 + 0.1	1.3
2	<i>a</i>	0	0	0.5	0	0.2 + 0.1	0.8
	<i>б</i>	0	0	0.1	0	0.2 + 0.1	0.4
	<i>в</i>	0	0.3	0.5	0	0.2 + 0.1	1.1
	<i>г</i>	0,1	0.3	0.5	0	0.2 + 0.1	1.2
3	<i>a</i>	0	0	0.1	0	0.2 + 0.1	0.4
	<i>б</i>	0	0	0.5	0	0.2 + 0.1	0.8
	<i>в</i>	0,1	0.3	0.5	0	0.2 + 0.1	1.2
	<i>г</i>	0,1	0	0.5	0	0.2 + 0.1	0.9
4	<i>a</i>	0,1	0.3	0.7	0	0.2 + 0.1	1.4
	<i>б</i>	0,5	0.3	0.7	1	0.7	3.2
	<i>в</i>	0,1	0.3	0	0	0.7	1.1
	<i>г</i>	0,3	0.7	0.7	0	0.7	2.4
5	<i>a</i>	1	0.3	1	1	0.7	4.0
	<i>б</i>	0,3	1.0	0.8	1	1	4.05
	<i>в</i>	0,1	0.3	0.7	1	0.7	2.8
	<i>г</i>	1	0.3	0.8	0.5	0.2 + 0.1	2.9

6	a	0,5	0,3	0,9	0,1	0,7	2.5
	б	0,8	0,3	0,5	0,1	0,2+0,1	2,0
	в	0,3	0,5	0,8	1	0,7	3.3
	г	0,8	0,3	0,9	0,1	0,7	2.8
7	a	0	0	0,8	0	0,2+0,1	1,1
	б	0	0,3	0,8	0	0,7	1,8
	в	0	0	0	0	0,2+0,1	0,3
	г	0	0,3	0,7	0	0,2+0,1	1,3
8	a	0,8	0,3	0,8	1	0,7	3.6
	б	0,3	0,3	0,8	0	0,2+0,1	1,7
	в	0,3	0,3	0,7	0	0,7	2,0
	г	0,1	0,7	0,7	0	0,2+0,1	1,8
9	a	0	0,3	1	0,5	0,2+0,1	2,1
	б	0,1	0,3	0,8	1+0,5	0,7	3.4
	в	0,1	0,3	0,7	0	0,2+0,1	1,4
	г	0,1	0	0,8	0	0,2+0,1	1,2

Максимальное значение потенциала (**4,05**) и современную активность имеют блок 5б (рис. 3) что подтверждают и ранее полученные, при оценке геодинамического потенциала, результаты [Магомедов, 2021; Magomedov, 2021].

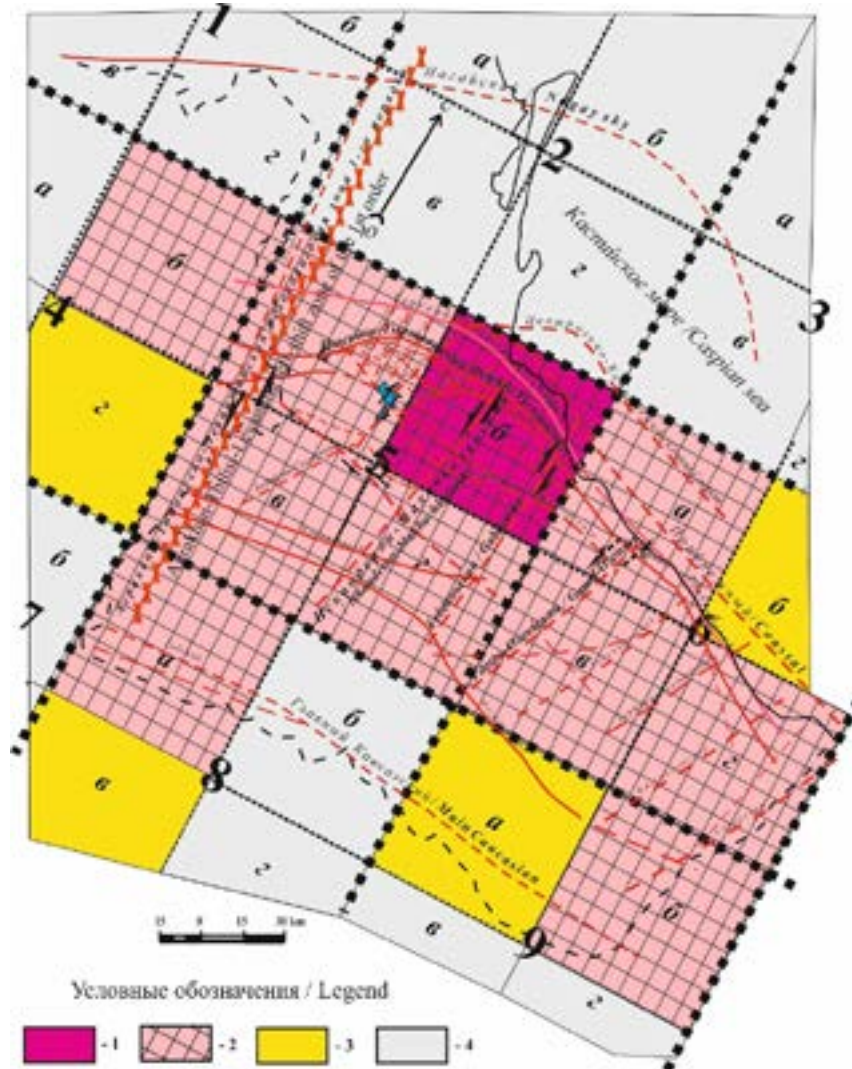


Рис. 3. Потенциальные зоны ВОЗ и блоки, имеющие критический сейсмотектонический потенциал, в северо-восточном сегменте Восточного Кавказа.

1 – блок, имеющий максимальный сейсмотектонический потенциал (**4.05**) и современную активность, 2 – потенциальные зоны ожидания возможных очагов сильных землетрясений, имеющие суммарные значения сейсмотектонического потенциала в пределах от **2.5** до **4.05**, 3 – блоки, имеющие критический (более **2,0** ед. – 50% барьер) сейсмотектонический потенциал, 4 – прочие блоки, имеющие сейсмотектонический потенциал ниже критического. Остальные обозначения приведены в условных обозначениях к рис. 3 /

Fig. 3. Potential PFE zones and blocks with critical seismotectonic potential in the north-eastern segment of the Eastern Caucasus.

1 – block, with the greatest seismotectonic potential (**4.05**) and modern activity; 2 – the potential of the waiting area of possible foci of strong earthquakes, with the total value of the seismotectonic potential in the range from **2.5** to **4.05**; 3 – blocks of critical (more than **2.0** units – 50 % threshold) seismotectonic potential; 4 – other blocks of the seismotectonic potential below the critical. The remaining symbols are given in the legend to Fig. 3

Выводы

В результате проведенных исследований составлена карта изменений сейсмо-тектонического потенциала (в условных единицах) территории северо-восточного сегмента Восточного Кавказа. Учитывая, что исторически активным являлся блок 5а, а современным активным – блок 5б, следует ожидать сильные сейсмические события со «сдвиговым» механизмом очага в блоках 5б и 6(а,в), а именно – на стыке Капчугайского грабена и Губденского блока по Искандерон-Махачкалинскому глубинному разлому, а также на стыке Губденского и Гамри-Озеньского блоков по одноименным глубинным разломам.

Выделенные потенциальные зоны ВОЗ в уточненном варианте, могут послужить основанием для постановки дополнительных геофизических и GPS (ГЛОНАС)-наблюдений, а также геодеформационных наблюдений (совместно с наблюдением за ГГД-полем) в режиме мониторинга.

Проведенные исследования позволят сделать обоснованный выбор объектов и методов эффективных управляющих воздействий на геологические системы с целью минимизировать негативные последствия от воздействия потенциальных катастрофических геологических процессов природного характера и обеспечат рациональное использование природных ресурсов в условиях повышенной геодинамической и сейсмической активности.

Литература

1. Арефьев С.С., Асманов О.А., Дейнега А.Г., Мусаев М.А., Шебалин Н.В. Количественные характеристики сейсмичности Дагестана. // Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. Сейсмология, геология, геофизика. – М.: Наука, 1980. – С. 10–17.
2. Бунэ В.И. Сейсмический режим Вахшского района Таджикской ССР. – Душанбе: АН Тадж. ССР, 1965. – С. 71–128.
3. Бунэ В.И., Гзовский М.В., Запольский К.К. и др. Методы детального изучения сейсмичности. // Тр. Ин-та Физики Земли АН СССР. – 1960. – №9(176). – С. 327.
4. Джигладзе Э.А. Энергия землетрясений, сейсмический режим и сеймотектонические движения Кавказа. – Тбилиси: Мецниереба, 1980. – 255 с.
5. Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В., Габараев А.Ф. Оценка сейсмической опасности территории и построение вероятностных карт. // Геология и геофизика Юга России. – 2011. – №1. – С. 48–58.
6. Краснопевцева Г.В. и др. Результаты глубинного сейсмического зондирования земной коры Кавказа. – В кн.: Глубинное строение Кавказа. – М.: Наука, 1966. – С. 43–56.
7. Левкович Р.А., Магомедов А.М., Асманов О.А. К сейсмическому районированию Дагестанской АССР. // Сейсмический режим территории Дагестана. Сб. Ин-та геологии Даг. ФАН СССР. – 1977. – №1. – С. 31–40.
8. Леонов Ю.Г. Тектоника и геодинамика на современном этапе: вопросы методологии исследований. // Геология и геофизика Юга России. – 2011. – №1. – С. 4–19.
9. Магомедов Р.А. Особенности связи между пространственно-временным распределением сейсмичности, уровнем геодинамического потенциала блоков земной коры и разломно-блоковой тектоникой Восточного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11(1). – С. 69–80. DOI: 10.46698/VNC. 2021.72.56.006.
10. Мазур И.И., Молдаванов О.И., Шишов В.Н. Инженерная экология. // Учеб. пособие для вузов. В 2 т. Под общ. ред. И.И. Мазура. – М.: Высшая школа, 1996. – 636 с.
11. Мусаев М.А. Пространственно-временные вариации распределения сейсмично-

сти на территории Дагестана с сопредельными территориями за 2006–2019 гг. // Тр. Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2020. – №1(80). – С. 70–76. DOI: 10.33580/2541-9684-2020-64-1-70-76.

12. Рейснер Г.И. и др. Типизация земной коры и сейсмический потенциал Сахалина. // Вулканология и сейсмология. – 1998. – №4-5. – С. 103–111.

13. Рейснер Г.И., Рогожин Е.А. Прогнозирование сейсмического потенциала. // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их источников. Научно-практическая конференция. 26-27 июня 2001 г. Доклады и выступления. – М.: Центр «Антистихия», 2002. – С. 236–241

14. Ризниченко Ю.В. Сейсмическая активность территории СССР. – М.: Наука. 1979. – 192 с.

15. Тишкин Б.М. Способ оценки геодинамического потенциала структур и использование его в геологических задачах. // Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». – 2006. – №1. Вып. 7. – С. 138–152.

16. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №4. – С. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

17. Bornyakov S.A., Ma J., Miroshnichenko A.I., Guo Y., Salko D.V., Zuev F.L. Diagnostics of meta-unstable state of seismically active fault. // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2017. – Vol. 8(4). – pp. 989–998.

18. Imaeva L.P., Gusev G.S., Imaev V.S., Ashurkov S.V., Melnikova V.I., Seredkina A.I. Geodynamic activity of modern structures and tectonic stress fields in northeast Asia. // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2017. – Vol. 8(4). – pp. 737–768.

19. Magomedov R.A. Geocological significance of block potential in the Eastern Caucasus in an arid climate. // *Arid ecosystems*. – 2021. – Vol. 27. No.3(88). – pp. 111–119. DOI: 10.1134/S2079096121030094.

20. McClusky S., Balassanian S., Barku C. et al. Global Position System constraints on plate kinematics and dynamics of the Mediterranean and Caucasus. // *J. Geophys. Res.* – 2000. – Vol. 105. N B3. – pp. 5695 – 5719.

21. Zaalishvili V.B., Rogozhin E.A. Assessment of Seismic Hazard of Territory on Basis of Modern Methods of Detailed Zoning and Seismic Microzonation. // *The Open Construction and Building Technology Journal*. – 2011. – Vol. 5. – pp. 30–40.

References

1. Arefiev S.S., Asmanov O.A., Deinega A.G., Musaev M.A., Shebalin N.V. Quantitative characteristics of the seismicity of Dagestan. Dagestan earthquake on May 14, 1970. *Seismology, geology, geophysics*. Moscow. Nauka, 1980. pp. 10–17. (In Russ.)

2. Bune V.I. Seismic regime of the Vakhsh region of the Tajik SSR. Dushanbe. Academy of Sciences of Tajik SSR, 1965. pp. 71–128. (In Russ.)

3. Bune V.I., Gzovsky M.V., Zapolsky K.K. et al. Methods of detailed study of seismicity. Proceedings of the IPE of the Academy of Sciences of the USSR. 1960. No. 9. Issue 176. pp. 327. (In Russ.)

4. Dzhibladze E.A. Energy of earthquakes, seismic regime and seismotectonic movements of the Caucasus. Tbilisi. Metsniereba, 1980. 255 p. (In Russ.)

5. Zaalishvili V.B., Dzeranov B.V., Gabaraev A.F. Seismic hazard assessment of the territory and construction of probability maps. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2011. No. 1. pp. 48–58. (In Russ.)

6. Krasnopevtseva G.V. et al. Results of deep seismic sounding of the Earth's crust in the

Caucasus. In the book: The deep structure of the Caucasus. Moscow. Nauka, 1966. pp. 43–56. (In Russ.)

7. Levkovich R.A., Magomedov A.M., Asmanov O.A. Towards seismic zoning of the Dagestan ASSR. Seismic regime of the territory of Dagestan. In: Proceedings of the Institute of Geology Dagestan Branch of AS USSR. 1977. No. 1. pp. 31–40. (In Russ.)

8. Leonov Yu.G. Tectonics and geodynamics at modern stage: research methodology questions. Geology and Geophysics of the South of Russia. 2011. No. 1. pp. 4–19. (In Russ.)

9. Magomedov R.A. Features of relationship between spatial-time distribution of seismicity, the level of geodynamic potential of the earth's crust blocks and fault-block tectonics of the Eastern Caucasus. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 69–80. DOI: 10.46698/VNC.2021.72.56.006. (In Russ.)

10. Mazur I.I., Moldavanov O.I., Shishov V.N. Engineering ecology. Manual for graduate students. In 2 vol. ed. I.I. Mazur. Moscow. Higher school, 1996. 636 p. (In Russ.)

11. Musaev M.A. Spatio-temporal variations in the seismicity distribution in the territory of Dagestan with adjacent territories for 2006–2019. In: Proceedings of Institute of Geology DSC RAS. 2020. No. 1. Issue 80. pp. 70–76. DOI: 10.33580/2541-9684-2020-64-1-70-76. (In Russ.)

12. Reisner G.I. et al. Typification of the Earth's crust and the seismic potential of Sakhalin. Volcanology and seismology. 1998. No. 4-5. pp. 103–111. (In Russ.)

13. Reisner G.I., Rogozhin E.A. Prediction of seismic potential. Problems of forecasting emergency situations and their sources. Scientific and practical conference. June 26-27, 2001 Reports and presentations. Moscow. Center Antistikhia, 2002. pp. 236–241. (In Russ.)

14. Riznichenko Yu.V. Seismic activity in the territory of the USSR. Moscow. Nauka. 1979. 192 p. (In Russ.)

15. Tishkin B.M. A method for assessing the geodynamic potential of structures and its use in geological problems. Bulletin KRAUNZ. Series "Earth Sciences". 2006. No. 1. Issue 7. pp. 138–152. (In Russ.)

16. Chotchaev H.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high-altitude territories. Geology and Geophysics of the South of Russia. 2020. Vol. 10. No.4. pp. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005 (In Russ.)

17. Bornyakov S.A., Ma J., Miroshnichenko A.I., Guo Y., Salko D.V., Zuev F.L. Diagnostics of meta-instable state of seismically active fault. Geodynamics & Tectonophysics. 2017. Vol. 8. Issue 4. pp. 989–998.

18. Imaeva L.P., Gusev G.S., Imaev V.S., Ashurkov S.V., Melnikova V.I., Serechkina A.I. Geodynamic activity of modern structures and tectonic stress fields in northeast Asia. Geodynamics & Tectonophysics. 2017. Vol. 8. Issue 4. pp. 737–768.

19. Magomedov R.A. Geoecological significance of block potential in the Eastern Caucasus in an arid climate. Arid ecosystems. 2021. Vol. 27. No.3. Issue 88. pp. 111–119. DOI: 10.1134/S2079096121030094.

20. McClusky S., Balassanian S., Barku C. et al. Global Position System constraints on plate kinematics and dynamics of the Mediterranean and Caucasus. J. Geophys. Res. 2000. Vol. 105. N B3. pp. 5695–5719.

21. Zaalishvili V.B., Rogozhin E.A. Assessment of Seismic Hazard of Territory on Basis of Modern Methods of Detailed Zoning and Seismic Microzonation. The Open Construction and Building Technology Journal. 2011. Vol. 5. pp. 30–40.