Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 551.24

DOI: 10.19110/geov.2021.11.2

Дискретность земной коры, энергоемкость блоков и сейсмичность Европейского Севера России

Ю. Г. Кутинов, Т. Я. Беленович, З. Б. Чистова

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени акад. Н. П. Лаверова УрО РАН, Архангельск
kutinov@fciarctic.ru; belenovichtya@yandex.ru; zchistova@yandex.ru

В статье приводятся результаты расчетов коэффициентов дискретности и энергоемкости мегаблоков, трансблоковых зон и узлов их пересечения на территории Европейского Севера России (Балтийский щит и север Русской плиты). Проведены расчеты поверхностной плотности разломов и функции дробления («блочности») мегаблоков, трансблоковых зон и узлов их пересечения. Анализ полученных параметров показал, что для сейсмоактивных зон и узлов их пересечения характерны высокие значения исследуемых параметров, сопоставимые со значениями, типичными для Арктического сейсмического пояса. Таким образом, можно говорить о пространственной связи блоков повышенной дискретности, энергоемкости и поверхностной плотности разломов с топографическим положением землетрясений.

Ключевые слова: Европейский Север России, блоки земной коры, дискретность, энергоемкость, сейсмичность.

Discreteness of the Earth's crust, energy consumption of blocks and seismicity of the European North of Russia

Y. G. Kutinov, T. Ya. Belenovitch, Z. B. Chistova

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the UB RAS, Arkhangelsk

The article presents results of calculations of the coefficients of discreteness and energy consumption of megablocks, trans-block zones and intersection nodes in the territory of the European North of Russia (the Baltic Shield and the North of the Russian Plate). Calculations of fault surface density and the crushing («blockiness») function are carried out. Analysis of the obtained parameters showed that seismically active zones and nodes of their intersection are characterized by high values of the studied parameters comparable to the values typical for the Arctic seismic belt. Thus, we can talk about the spatial connection of blocks with increased discreteness, energy saturation and surface density of the fault with the topographic position of earthquakes.

Keywords: the European North of Russia, blocks of the Earth's crust, Energy consumption, seismicity.

Введение

Изучение иерархической дискретности земной коры связано с именами Л. И. Красного [8], М. А. Садовского [15, 16], В. Ф. Писаренко [17] и ряда других исследователей. На основе их исследований создана система структурной организации как Земли в целом, так и отдельных ее регионов. Установлено, что земная кора дискретна и имеет четко выраженное слоисто-блоковое строение. Среднее расстояние между границами отдельных геоблоков в системе подчиняется закону, выраженному следующей зависимостью:

$$L_{i+1}/L = K, \quad (1)$$

где K — масштабный коэффициент перехода от одного масштаба блоков к другому (от 2 до 5, в среднем —

3.5), отражающий дискретность земной коры при расчете для ее конкретных структур; L_i — максимальная ширина исследуемого геоблока; L_{i+1} — максимальная ширина геоблока следующего порядка.

Как отмечал М. А. Садовский, «разброс значений K указывает на то, что отмечаемое подобие несколько условно и имеет характер статистический» [16, с. 322].

Им было сформулировано положение о том, что геологическая среда всегда находится в критическом энергонасыщенном состоянии, во всяком случае ниже глубины 5—6 км, и основные сейсмические события всегда происходят только по межблоковым структурам [16]. Геомеханики и тектонофизики, изучающие характер деформирования земной коры под воздействием тектонических нагрузок, пришли к выводу, что

Для цитирования: Кутинов Ю. Г., Беленович Т. Я., Чистова З. Б. Дискретность земной коры, энергоемкость блоков и сейсмичность Европейского Севера России // Вестник геонаук. 2021. 11(323). С. 16–24. DOI: 10.19110/geov.2021.11.2.

For citation: Kutinov Y. G., Belenovitch T. Ya., Chistova Z. B. Discreteness of the Earth's crust, energy consumption of blocks and seismicity of the European North of Russia. Vestnik of Geosciences, 2021, 11(323), pp. 16–24, doi: 10.19110/geov.2021.11.2.

сложная блоковая структура верхней части литосферы является результатом распределения диссипированной механической энергии [13]. Различные структуры земной коры приспосабливаются к передаче энергии на более низкие иерархические ступени, вплоть до возникновения некоторого динамического равновесия. Но новая флуктуационная волна энергии, поступающая извне, формирует новое движение, новую организацию. Все это и определяет автомодельные процессы упорядочения структуры, самоорганизацию системы, состоящей из блоков и отдельных горных пород разного порядка. И поэтому, как полагал М. А. Садовский [15, 16], горную породу можно рассматривать как часть значительно более широких природных открытых систем, способных к самоорганизации за счет энергии, поступающей извне. Т. е. эти структуры находятся в колебательном режиме с меняющимся напряженно-деформированным состоянием.

В свете вышеизложенного актуальным является исследование дискретности земной коры, энергоемкости блоков и плотности разломов, характерных для блоков земной коры, и, как следствие, отражение блоков с разными параметрами в геоморфометрических характеристиках современного рельефа. Необходимо понять, являются ли эти блоки морфоструктурными и можно ли в дальнейшем использовать цифровое моделирование рельефа для их выделения. Авторы в своей работе исходили из положения о сложной структуре разломов как геологических тел. В зависимости от ранга тектонической структуры блоки и трансблоковые зоны сами являются межблоковыми структурами определенного ранга, ограничивающими более крупные структуры земной коры. Блочная структура и наличие выраженных разноориентированных движений индивидуальных и консолидированных блоков приводят к мозаичному, пространственно неоднородному распределению характеристик среды. То есть дискретность литосферы характеризуется сложным сочетанием разных по знаку, направленности и интенсивности тектонических движений, запечатленных в современном строении земной коры. Как следствие, это отражается на таких параметрах, как коэффициент дискретности, значение энергоемкости тектонических структур и индекс расчлененности современного рельефа, а также на сейсмической активности геологических блоков.

Методика исследований

Нами были проведены расчеты коэффициента дискретности для основных мегаблоков Европейского Севера России (Мурманского, Беломорского) и трансблоковых зон (Хибинской и Балтийско-Мезенской), а также узлов их сочленения, выделенных по геолого-геофизическим данным (рис. 1). Эти структуры характеризуются максимальным количеством зарегистрированных сейсмических событий (рис. 2).

Коэффициент дискретности, характерный для взаимоотношения блоков разных порядков, рассчитывался по формуле (1). Значения K_{cp} , характерные для мегаблоков и трансблоковых зон, рассчитывались как среднее арифметическое по формуле (2):

$$K_{cp} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n K_i). \quad (2)$$

Рис. 1. Схема разломо-блоковой тектоники Европейского Севера России [11]:

1 — западная граница Тиманского поднятия; 2 — разломы, ограничивающие: а) геоблоки, б) мегаблоки, в) трансблоковые зоны; мегаблоки и их индексы: М — Мурманский, К — Кольский, В — Беломорский, Kr — Карельский, L — Ладожский; 4 — трансблоковые зоны: I — Ладожско-Баренцевоморская, II — Хибинская, III — Балтийско-Мезенская, IV — Вельско-Цильменская; 5 — расчетные углы падения поверхностей разломов

Fig. 1. Scheme of fault-block tectonics of the European North of Russia [11]:

1 — the western border of the Timan uplift; 2 — faults that limit: geoblocks (a), megablocks (b), transblock zones (c); the megablocks and their indices: M — Murmansk, K — Kolsky, B — Belomorsky, Kr — Karelian, L — Ladoga; 4 — transblock zones: I — Ladoga-Barents Sea, II — Khibiny, III — Baltic-Mezen, IV — Velsko-Tsilmen'skaya; 5 — calculated angles of fall of fault surfaces

Для расчетов коэффициента дискретности нами использовались карты блокового строения восточной части Балтийского щита [14]. Для территории севера Русской плиты была задействована карта из материалов отчета В. З. Березовского и др. из фондов Архангельского филиала ФБУ «ТФИ по СЗФО»*. Результаты расчетов приведены ниже.

По геолого-геофизическим данным докембрийский фундамент региона и перекрывающий его плитный покров относятся к двум геоблокам: Карело-Кольскому и Белорусско-Балтийскому [4]. Карело-

* Составление карт глубинного строения и прогноза кимберлитового магматизма севера Восточно-Европейской платформы м-ба 1:1 000 000: Отчет по теме А.И.1/601(5) / В. З. Березовский, В. Н. Ширококов, Л. В. Губайдуллина и др. Архангельск: АПГО, 1988. 146 с.

Sostavlenie kart glubinnogo stroenija i prognoza kimberritovogo magmatizma severa Vostochno-Evropskoj platformy m-ba 1:1000000 (Mapping of the deep structure and forecast of kimberlite magmatism in the north of the East European platform scale 1:1000000). Berezovskij V. Z., Shirobokov V. N., Gubajdullina L. V. et al. Report on A. I. 1/601(5). Arhangelsk, APGO, 1988, 146 p.

Кольский геоблок состоит из четырех мегаблоков (Мурманского, Кольского, Беломорского и Карельского), различающихся по возрасту консолидации, составу докембрийской коры и характеру граничных поверхностей (рис. 1). Зоны сочленения этих мегаблоков обладают повышенной мощностью земной коры (до 50 км) и трассируются не только на территории Балтийского щита, но и в пределах Русской плиты. Блоки более высоких порядков (III и IV) различаются по глубинному строению и структурно-вещественным типам слагающих их комплексов. Границы блоков III-IV порядков представлены линейными зонами разломов [4]. Характерной особенностью региона является наличие трансрегиональных трансблоковых тектонических зон (рис. 2): субмеридиональной Ладожско-Балтийско-Мурманской и северо-восточных — Хибинской, Балтийско-

Мезенской и Вельско-Цильменской, являющихся линейными разломно-блоковыми [4] структурами. Нами было принято условие, что выделенные по высокой сейсмической активности Мурманский и Беломорский мегаблоки, Хибинская и Балтийско-Мезенская трансблоковые зоны являются блоками I порядка.

Результаты расчета дискретности мегаблоков, дополненные расчетами их энергоёмкости, по мнению авторов, позволяют уточнить современную геодинамику земной коры и проявление внутриплитной сейсмичности.

Формула расчета энергоёмкости:

$$W_{э/с} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3(3M-E)}{ME} (\rho g H)^2 + \frac{1}{2M} \cdot \left(\frac{E_c}{V} \right)^2, \quad (3)$$

где M — модуль сдвига; E — модуль Юнга; ρ — плотность породы; g — ускорение свободного падения; H — глубина залегания слоя; E_c — сейсмическая энергия землетрясения; V — объем блока.

При умножении на объем мегаблока или трансблоковой зоны получается значение полной энергоёмкости исследуемой структуры.

Ниже приведен пример расчета [3]:

$H = 40$ км; $E = 7.7 \cdot 10^5$ кгс/см² = $7.7 \cdot 10^8$ гс/см²; $\rho = 3.38$ г/см³ (средняя плотность горных пород земной коры равна 2.8 г/см³); $V_s = 8 \cdot 10^5$ см/сек; $H = 4 \cdot 10^6$ см; $g = 9.8 \cdot 10^2$ см/сек²; при этом модуль сдвига $M = V_s^2 \cdot \rho$, (V_s — скорость поперечной сейсмической волны); $W_{э/с} = 9.8 \cdot 10^{11}$ эрг/м³.

Для уточнения структуры вышеперечисленных мегаблоков, трансблоковых зон и узлов их сочленения были рассчитаны поверхностная плотность разломов и функция дробления по А. Н. Колмогорову [7].

Для выделения участков повышенной плотности использовалась схема глубинных структурообразующих разломов под редакцией Д. М. Мильштейна [18] масштаба 1:10000000. Методом прямоугольного «скользящего окна» была подсчитана их плотность (количество разломов) независимо от ранга. Размер «окна» составил 100×100 км с перекрытием в 50 км (для избежания влияния краевых эффектов). Подсчитанные значения присваивались центру «окна». Изолиниями были ограничены участки с одинаковыми значениями. В результате полученные значения определялись как значения поверхностной плотности разломов (10^{-4} разлом/км²).

Обычно в качестве искомого параметра выбирается характерный размер трещины (на локальном уровне) или «блочность» — характерный размер «блока», высекаемого сетью трещин в монолите [6]. В данном исследовании нами под «блочностью» горных пород понимается совокупность блоков, «высекаемых» ограничивающими их разломами. При поисках теоретической модели для распределения «блочности» активно обсуждается гипотеза логарифмически нормального закона. Эта модель была предложена А. Н. Колмогоровым [7] для результатов дробления горных пород. Она аналитически объясняет возникновение логнормального распределения размеров блоков при дроблении монолита горных пород. В нашем случае суть этой модели излагается по А. И. Иванову [6]. Рассматривается квазиоднородный участок сети разломов (в нашем случае структурообразующих) фиксированного ранга в пределах блока. Квазиоднородность означает, что линейная плотность разломов в каждом

Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений севера европейской части России за 1467–1995 гг. (по: [19] с дополнениями).

1 — номера ощутимых землетрясений; 2 — главные разломы; 3 — мегаблоки и трансблоковые зоны и их индексы: М — Мурманский, К — Кольский, В — Беломорский, Кр — Карельский, Л — Ладожский; трансблоковые зоны: I — Ладожско-Балтийско-Мурманская, II — Хибинская, III — Балтийско-Мезенская, IV — Вельско-Цильменская

Fig. 2. Map of the epicenters of earthquakes in the North of the European part of Russia for 1467–1995 (by: [19] with add-on).

1 — numbers of tangible earthquakes; 2 — main faults; 3 — mega-blocks and transblock zones and their indices: М — Murmansk, К — Kolsky, В — Belomorsky, Кр — Karelian, Л — Ladoga; trans-block zones: I — Ladoga-Barents Sea, II — Khibiny, III — Baltic-Mezen, IV — Velsko-Tsilmenskaya

фиксированном направлении подчинена закону Пуассона, параметр λ которого определяется через тензор ориентации трещиноватости на данном участке. Тогда расстояние между соседними трещинами/разломами (L) в этом же направлении распределено по экспоненциальному закону с тем же параметром λ . При выборе трех взаимно ортогональных направлений (простираций) мы получаем три независимых пуассоновских потока. Расстояние в каждом из них между соседними точками деления меняется экспоненциально с параметром λ_k , (где $k = 1, 2, 3$), определяемым густотой трещин (разломов) в соответствующем направлении (простирации).

В качестве статистической меры «блочности» квазиоднородного участка [6] выступает произведение расстояний между точками деления в направлениях 1, 2, 3 соответственно:

$$B = L_1 \cdot L_2 \cdot L_3, \quad (4)$$

где B [6] изменяется в интервале $0 \div 1$, так как длины в произведении (4) были масштабированы на единицу.

Выбор такой меры становится понятным, если представить трещиноватость участка как три взаимно перпендикулярные серии трещин с густотами λ_k , $k = 1, 2, 3$. Для упрощения длины во всех трех направлениях были масштабированы на единицу [6, с. 365].

При условии, что сомножители распределены по экспоненциальному закону, закон распределения будет иметь следующий вид:

$$f(B) = \frac{1}{2} \ln^2 B. \quad (5)$$

Формула (5) была нами применена при расчетах функции дробления («блочности»).

Связь сейсмичности с действующими в земной коре и литосфере тектоническими напряжениями общеизвестна. В связи с этим небезынтересно остановиться на анализе изгибных деформаций земной коры. На первой стадии исследования нами были выделены участки (блоки) устойчивого направления максимальной главной кривизны изгибных деформаций, представленной на карте [5] в виде прямых линий. Эти линии были помещены на стереографическую проекцию верхней полусферы сетки Вульфа в азимутах их простираций от направления на север по часовой стрелке. В пределах выделенных участков (блоков) строились сводные розы-диаграммы направлений кривизны изгибных деформаций, вызванных современными вертикальными движениями земной коры.

Далее нами был проведен расчет отражения структур фундамента в современном рельефе для выделения прямых и обратных форм отражения. Для этого использовалась подготовленная цифровая модель рельефа (ЦМР) ASTER GDEM v.2 и карта поверхности фундамента м-ба 1:1000000 [12]. Более подробно принципы выбора модели, программного обеспечения и методики обработки изложены в работе авторов [10]. Методика расчета описана в работе [12].

Затем был рассчитан индекс расчлененности рельефа на всю территорию Архангельской области. Индекс расчлененности рельефа (TRI) служит для объективной количественной оценки изрезанности (неоднородности) рельефа. Значение индекса расчлененности рельефа рассчитывалось по формуле из работы [20]:

$$TRI = \sqrt{\sum (h_{0,0} - h_{i,j})^2}, \quad (6)$$

где $h_{0,0}$ — значение высоты рассматриваемой ячейки ЦМР; $h_{i,j}$ — значения высот каждой из 8 смежных ячеек.

Чем выше TRI , тем выше среднее квадратичное отклонение высот соседних ячеек от высоты рассматриваемой ячейки, что геометрически интерпретируется как большая расчлененность рельефа. Высота ячейки измеряется относительно некоторого фиксированного уровня, принятого нулевым в зависимости от исходной ЦМР региона, в т. ч. и от уровня моря.

Результаты исследований

Результаты расчетов коэффициента дискретности для основных мегаблоков Европейского Севера России (Мурманского, Беломорского) и трансблоковых зон (Хибинской и Балтийско-Мезенской), а также для узлов их сочленения показали, что исследуемые тектонические структуры и узлы их пересечения характеризуются довольно высокими значениями ($K_{max} = 2.32 - 2.64$). Максимальные значения коэффициента дискретности (K_{max}) в пределах исследуемой территории (рис. 1) характерны для Беломорского мегаблока и Балтийско-Мезенской трансблоковой зоны и, следовательно, узла их пересечения/сочленения. В целом, получены следующие значения коэффициента дискретности: Мурманский мегаблок — 2.53, Беломорский мегаблок — 2.64, Хибинская трансблоковая зона — 2.63, сочленение Беломорского мегаблока и Хибинской зоны — 2.35, сочленение Беломорского мегаблока и Балтийско-Мезенской трансблоковой зоны — 2.42. Таким образом, исследуемые сейсмоактивные зоны (рис. 1, 2) и узлы их пересечения характеризуются высоким коэффициентом дискретности. Много это или мало? Следует отметить, что максимум коэффициента дискретности ($K = 5.0$) приходится на такие сеймотектонические пояса, как Тихоокеанский, Кавказский и др. [1].

Расчеты энергоемкости блоков земной коры в пределах севера Русской плиты [2] показали, что значения $W_{3/c}$ в пределах сейсмически активного Беломорского мегаблока и Балтийско-Мезенской трансблоковой зоны равны $(22 - 24) \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$ при средних значениях $(15 - 17) \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$. Аналогичные расчеты были проведены и для хребтов Гаккеля и Книповича в пределах Арктического сейсмического пояса [9]. Значения сдвиговых деформаций хр. Гаккеля варьируют в пределах $(24 - 26) \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$; для хребта Книповича — $(20 - 24) \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$. Как видно, значения практически идентичны, что говорит о схожести современных геодинамических режимов (преобладание растяжения) вышеперечисленных структур [9, 11, 12].

Максимальное значение поверхностной плотности разломов для исследуемого региона достигало $5 \cdot 10^{-4}$, минимальное — $2 \cdot 10^{-4}$ разлома на км^2 , за исключением отдельных локальных участков, где значения были равны $1 \cdot 10^{-4}$ разлома на км^2 (рис. 3, А).

Как видно, наибольшую площадь исследуемой территории занимают участки со значениями поверхностной плотности $3 - 4 \cdot 10^{-4}$ разлома на км^2 . Локальные участки с максимальным значением плотности имеют северо-западное и северо-восточное простираения, совпадающие с простираениями Беломорского мега-

Рис. 3. Карты поверхностной плотности разломов и значений функции дробления («блочности»):

А — карта поверхностной плотности разломов: 1 — изолинии, разделяющие участки различных значений их плотности, в 10⁻⁴ разлом/км²; 2 — разломы, ограничивающие мегаблоки и трансблоковые зоны; 3 — участки минимальных и максимальных значений плотности; 4 — суммарное количество разломов в ячейке; 5 — мегаблоки: М — Мурманский, К — Кольский, В — Беломорский, Кр — Карельский; 6 — трансблоковые зоны: I — Хибинская, II — Балтийско-Мезенская;
В — схема значений функции дробления («блочности»): 1 — изолинии значений функции дробления; 2 — участки минимальных и максимальных значений; 3 — значения функции дробления в «окнах»

Fig. 3. Maps of surface density fault and values of the crushing function («blockiness»):

Map of surface fault density (A): 1 — isolines separating areas of different values of their density (10⁻⁴ fault/km²); 2 — faults limiting megablocks and transblock zones; 3 — areas of minimum and maximum density values; 4 — the total number of faults in the cell; 5 — megablocks: M — Murmansk, K — Kolsky, B — Belomorsky, Kr — Karelian; 6 — transblock zones: I — Khibiny, II — Baltic-Mezen;
Scheme of values of the crushing function («blockiness») (B): 1 — isolines of values of the fault density function; 2 — areas of minimum and maximum values; 3 — values of the crushing function in «windows»

блока Балтийско-Мезенской трансблоковой зоны соответственно. Естественно, полученные данные и не должны быть одинаковыми для всей территории, поскольку плотность характеризует в определенной степени раздробленность участка, выделенного по сумме разломов. В тоже время на схеме глубинных разломов [18] каждый разлом представлен индивидуально, что не дает интегральной площадной характеристики блоков. Идея наших расчетов состояла в том, чтобы выделить участки с максимальной поверхностной плотностью разломов, т. е. откартировать относительно раздробленные участки (блоки). Имея такую карту, можно охарактеризовать те же мегаблоки и морфоструктурные узлы, о которых говорилось выше. К примеру, Беломорский мегаблок, у которого наиболее высокий коэффициент дискретности (2.64), на всем своем протяжении с северо-запада на юго-восток делится на 4 участка с различными значениями плотности разломов. Участки максимальной и минимальной поверхностной плотности чередуются с северо-запада на юго-восток так: 4—5·10⁻⁴, 3·10⁻⁴, 4—5·10⁻⁴, 3—2·10⁻⁴ разлома на км². То же самое можно сказать и о других мегаблоках, только значения поверхностной плотности там другие. Так, сочленение Беломорского мегаблока и Балтийско-Мезенской зоны характеризуется сравнительно высоким значением коэффициента дискретности (2.42), а сочленение того же Беломорского мега-

блока с Хибинской трансблоковой зоной — 2.35. Однако по значению поверхностной плотности разломов картина выглядит иначе. В первом случае это значение варьируется от 4 до 2·10⁻⁴ разломов на км², а во втором — 4—5·10⁻⁴ разломов на км². Авторы отдают себе отчет в том, что указанные цифры относительно и зависят от используемой при расчетах детальности схемы глубинных разломов, выделенных по геофизическим данным определенного масштаба, т. е. от ранга анализируемых разломов. Тем не менее в первом приближении они наглядно отражают общую картину для тектонических нарушений и блоков определенных рангов.

На рис. 3, В представлена схема значений функции дробления («блочности»), рассчитанных по формуле (5), в ячейках 100×100 км. Изолиниями разграничены участки различных значений функции. Максимальные значения достигают 2.4, а минимальные — 0 (преобладающие значения — 0.6). В основном значение функции распределения варьируется от 0.6 до 1.3. При сопоставлении двух схем (рис. 3, А и В) видно, что контуры изолиний практически совпадают. Подобное совпадение говорит о том, что подсчет разломов непосредственно по схеме зон глубинных разломов и расчеты функции дробления («блочности») указывают однозначно на одни и те же минимально и максимально раздробленные участки земной коры в пределах исследуемой территории. Это совпадение

вполне объяснимо, т. к. при расчетах использовались структурообразующие разломы. Однако на локальном уровне (с наличием аномальных участков) различия все же есть.

По мнению ряда авторов [5, с. 230], «связь сейсмичности с действующими в земной коре тектоническими напряжениями несомненна», и для ее установления продуктивным является анализ тензорных характеристик современных изгибных деформаций.

При анализе характера изгибных деформаций (рис. 4) отмечено, что на исследуемой территории выделяются в основном протяженные зоны северо-западного простирания однонаправленного максимального изгиба блоков земной коры, пространственно совпадающие с Онего-Кандалакшским грабеном, испытывающим активизацию [12] на современном этапе.

Анализ карты направлений максимальной главной кривизны изгиба земной коры в узле пересечения Беломорского блока и Балтийско-Мезенской трансблоковой зоны показал, что максимальные изгибные деформации здесь отмечаются в азимутах 20–40° и соответственно 200–220° (рис. 4).

Рис. 4. Сводные розы-диаграммы (в проекции на верхнюю полусферу сетки Вульфа) направлений, вызванных новейшими движениями земной коры:

1 — розы-диаграммы; 2 — зона устойчивого максимального изгиба блоков

Fig. 4. Summary rose-diagrams (in projection on the upper hemisphere of the Wolfe grid) directions caused by the latest movements of the earth's crust:

1 — rose-diagrams; 2 — zone of stable maximum bending of blocks

Выше было отмечено, что зона максимальных изгибных деформаций в пределах севера Русской плиты выделяется в северо-западном направлении. Таким образом, сравнивая простирание мегаблока и трансблоковой зоны с ориентацией плоскостей разрыва в групповых механизмах очагов землетрясений, нетрудно заметить, что в случае взброса и взбрососдвига их направления совпадают [12]. Так, в случае взброса простирание обеих плоскостей ориентировано вдоль Беломорского мегаблока, а в случае взбрососдвига — вдоль Балтийско-Мезенской трансблоковой зоны.

При сопоставлении данных по изгибным деформациям с картой отражения кристаллического фундамента в современном рельефе (рис. 5) отчетливо видно, что узел пересечения Беломорского мегаблока и Балтийско-Мезенской зоны выделяется в обратных формах отражения фундамента, а сама Балтийско-Мезенская зона разделяется на 2 части: обратные формы на юго-западе и прямые на северо-востоке. Беломорский мегаблок характеризуется сложным чередованием форм отражения.

Рис. 5. Прямые и обратные формы отражения структур фундамента в дневном рельефе в переходных и дискретных цветах [12]

Fig. 5. Direct and inverse forms of reflection of foundation structures in the daytime relief in transitional and discrete colors [12]

На карте индекса расчленённости рельефа (рис. 6) вышеперечисленные структуры отражаются достаточно отчетливо, причем пониженными значениями индекса. Это показывает слабую проницаемость для энергомассопереноса пород кристаллического фундамента и, соответственно, перекрывающих пород и, как следствие, повышенную способность накопления сейсмической энергии. Наследование структур фундамента в осадочном чехле и структуре поверхности современного рельефа авторами было доказано в более ранних работах [11, 12]. Причем наблюдается тот же характер, что и в отражении фундамента, т. е. Балтийско-Мезенская зона отчетливо разделяется на две части: с пониженными значениями матрицы раз-

Рис. 6. Индекс расчлененности рельефа (TRI) (размер ячейки 1920×1920 м) (по: [12]).

1 — граница Беломорского мегаблока, 2 — граница Балтийско-Мезенской трансблоковой зоны, 3 — новые землетрясения, зафиксированные Архангельской сейсмической сетью

Fig. 6. Terrain Ruggedness Index (TRI) (cell size 1920×1920 m) (by: [12]).

1 — Border of Belomorsky megablock, 2 — Border of Baltic-Mezen transblock zone, 3 — new earthquakes recorded by the Arkhangelsk seismic network

ницы и суммы нормированных высот рельефа дневной поверхности и глубин фундамента на юго-западе и относительно повышенными на северо-востоке.

Выводы

Широко используемые в настоящее время методы изучения приповерхностных структур земной коры, основанные на дискретных измерениях механических параметров (значений дифференциальных движений, различного вида деформаций и их производных) в отдельных участках (блоках), не позволяют получать целостную картину поведения сложноструктурированной геологической среды.

Проведенные нами расчеты показали, что наиболее сейсмоактивные структуры характеризуются повышенными значениями коэффициента дискретности и энергоемкости, т. е. для их активизации нужно минимальное приложение сил воздействия. Согласно карте сопоставления блоковой тектоники (рис. 1) и сейсмичности (рис. 2), основные землетрясения произошли в узле сочленения Беломорского мегаблока северо-западного простирания с Балтийско-Мезенской трансблоковой зоной северо-восточного простирания, что подтверждается нашими расчетами.

Значения поверхностной плотности разломов и функции дробления («блочности») говорят о сложном блоковом строении структур, причем участкам с повышенными значениями энергоемкости соответствуют участки с пониженными значениями поверх-

ностной плотности разломов. Таким образом, это структуры, предрасположенные к накоплению сейсмической энергии.

Сравнивая простирания Беломорского мегаблока и Балтийско-Мезенской трансблоковой зоны с ориентацией плоскостей разрыва в групповых механизмах очагов землетрясений нетрудно заметить, что в случае взброса и взбрососдвига направления их совпадают. Следовательно, можно предположить, что на современном геологическом этапе наиболее подвижным в тектоническом отношении является Беломорский мегаблок. Он же, согласно карте эпицентров землетрясений Европейского Севера (рис. 2), является наиболее сейсмически активным.

Анализ характера отражения структур фундамента в современном рельефе и пространственные особенности распределения значений индекса расчлененности рельефа подтверждают выводы о сложном блоковом строении структур и о разном характере их напряженно-деформированного состояния.

Повышенная поверхностная плотность разломов, дискретность и высокая энергоемкость блоков земной коры, пространственно совпадающая с положением землетрясений, говорят о возможности применения вышеперечисленных параметров для прогноза сейсмоактивных структур. Особенно это актуально для платформенных структур, характеризующихся землетрясениями с малыми магнитудами, не регистрируемыми существующими сейсмическими сетями. Последние результаты Архангельской сейсмической сети, зафиксировавшей новые землетрясения (рис. 6), подтверждают сделанный нами вывод.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН № гос. регистрации АААА-А18-118012390305-7.

Литература

1. Ананьин И. В. Сейсмическая опасность и экономический ущерб от землетрясений на Восточно-Европейской платформе // Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов: Материалы междунар. конф. Воронеж, 2001. С. 26—27.
2. Беленович Т. Я. О напряженно-деформируемом состоянии земной коры Срединно-Арктического хребта // Вестник Поморского гос. ун-та. Сер. Естественные и точные науки. 2005. № 2 (8). С. 12—18.
3. Беленович Т. Я. Дискретность земной коры Европейского Севера России и сейсмичность // Уральский геологический журнал. 2021. № 3 (141). С. 11—20.
4. Билибина Т. В. Блоковая тектоника и геодинамика земной коры северо-запада Русской платформы и принципы прогнозирования рудоносных структур // Блоковая тектоника и перспективы рудоносности Русской платформы. Л.: ВСЕГЕИ, 1986. С. 22—29.
5. Грачев А. Ф., Магницкий В. А., Мухамедиев Ш. А., Юнга С. Л. Тензорные характеристики неотектонических изгибных деформаций и кривизны поверхности фундамента литосферы Восточно-Европейской платформы // ДАН. 1995. Т. 340. № 3. С. 389—395.
6. Иванов А. И. Об иерархии масштабных уровней трещиноватости // Сергеевские чтения: Материалы годичной сессии РАН. Вып. 3. М.: ГЕОС, 2001. С. 364—366.

7. Колмогоров А. Н. О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // ДАН СССР, 1941. Т. 31. С. 99–101.

8. Красный Л. И. Глобальная система геоблоков. М.: Недра, 1984. 224 с.

9. Кутинов Ю. Г., Беленович Т. Я., Чистова З. Б. Современная геодинамика Арктического нефтегазоносного супербассейна // Глубинная нефть. 2013. Т. 1. № 9. С. 1307–1336.

10. Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Полякова Е. В., Чистова З. Б. Выбор базовой цифровой модели рельефа (ЦМР) равнинных территорий Севера Евразии и её подготовка для геологического районирования (на примере Архангельской области). Пенза: Социосфера, 2019. 176 с.

11. Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. Архангельск: Правда Севера, 2004. 283 с.

12. Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Полякова Е. В., Минеев А. Л. Применение цифровых моделей рельефа (ЦМР) для выделения тектонических структур древних платформ (на примере северо-запада Русской плиты). Пенза: Социосфера, 2020. 378 с.

13. Кунтцель В. В., Семаков Е. И., Корженевский Б. И., Симонова И. Ю. Структурно-тектонические особенности Крымского региона и их влияние на экзогенные геологические процессы // Геоэкология. 1993. № 6. С. 94–99.

14. Металлогения восточной части Балтийского щита: Комплект карт / Отв. ред. Т. В. Билибина и др. М.: Аэрогеология, 1979.

15. Садовский М. А. Автомодалность геодинамических процессов // Вестник АН СССР. 1986. № 8. С. 3–12.

16. Садовский М. А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва / Отв. ред. В. В. Адушкин. М.: Наука, 2004. 440 с.

17. Садовский М. А., Писаренко В. Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.

18. Схема зон глубинных разломов территории СССР (по геофизическим данным) / Е. М. Ананьева и др. Ред. Д. М. Мильштейн. М.: Мингео СССР, 1979.

19. Юдахин Ф. Н., Французова В. И. Сейсмичность севера европейской части России // Поморье в Баренц-регионе на рубеже веков: экология, экономика, культура: Материалы междунар. конф. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2000. С. 276–277.

20. Reily Shawn J., DeGloria Stephen D., Elliot Robert A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity // Intermountain Journal of Science, 1999. Vol. 5(1–4). P. 23–27.

Reference

1. Anan'in I. V. *Seismicheskaja opasnost i jekonomicheskij ushherb ot zemletrjasenij na Vostochno-Evropejskoj platforme* (Seismic hazard and economic damage from earthquakes on the Eastern European platform). *Sovremennaja geodinamika, glubinnoe stroenie i seismichnost' platformennyh territorij i sopredel'nyh regionov*. (Modern geodynamics, deep structure and seismicity of platforms and adjacent areas). Proceedings of conference. Voronezh, 2001, pp. 26–27.

2. Belenovich T. Ja. *O naprjazhenno-deformiruemom sostojanii zemnoj kory Sredinno-Arkticheskogo hrebt* (On the stress-strain state of the earth's crust of the Mid-Arctic Ridge). *Vestn.*

Pomor. gos. un-ta. Ser. Estestv. i toch. nauki (Bulletin of the Pomeranian State University. Series of Natural and Exact Sciences), 2005, No. 2 (8), pp. 12–18.

3. Belenovich T. Ja. *Diskretnost zemnoj kory Evropejskogo Severa Rossii i seismichnost* (Discreteness of the earth's crust of the European North of Russia and seismicity). *Ural Geological Journal*, 2021, No. 3(141), pp. 11–20.

4. Bilibina T. V. *Blokovaja tektonika i geodinamika zemnoj kory severo-zapada Russkoj platformy i principy prognozirovaniya rudonosnyh struktur* (Block tectonics and geodynamics of the earth's crust of the north-west of the Russian platform and the principles of forecasting ore-bearing structures). *Blokovaja tektonika i perspektivy rudonosnosti Russkoj platformy* (Block tectonics and prospects for ore content of Russian platform). Leningrad: VSEGEI, 1986, pp. 22–29.

5. Grachev A. F., Magnickij V. A., Muhamediev Sh. A., Junga S. L. *Tenzornye harakteristiki neotektonicheskikh izgibnyh deformacij i krivizny poverhnosti fundamenta litosfery Vostochno-Evropejskoj platform* (Tensor characteristics of neotectonic bending deformations and curvature of the surface of the foundation of the lithosphere of the East European platform). *DAN*. (Reports of the Academy of Sciences). 1995, V. 340, No. 3, pp. 389–395.

6. Ivanov A. I. *Ob ierarhii masshtabnyh urovnej treshhinov* (On the hierarchy of scale levels of fracture). *Sergeev Readings*, 3, Moscow: GEOS, 2001, pp. 364–366.

7. Kolmogorov A. N. *O logarifmicheski normal'nom zakone raspredelenija razmerov chastic pri droblenii* (On the logarithmically normal law of particle size distribution during crushing). *AS USSR*, 1941, V. 31, pp. 99–101.

8. Krasnyy L. I. *Globalnaya sistema geoblokov* (Global system of geoblocks). Moscow: Nedra. 1984. 224 p.

9. Kutinov Ju. G., Belenovich T. Ja., Chistova Z. B. *Sovremennaja geodinamika Arkticheskogo neftegazonosnogo superbassejna* (Modern geodynamics of the Arctic oil and gas superbasin). *Glubinnaja neft'* (Deep Oil), 2013, V. 1, No. 9, pp. 1307–1336.

10. Kutinov Ju. G., Mineev A. L., Poljakova E. V., Chistova Z. B. *Vybor bazovoj cifrovoj modeli rel'efa (CMR) ravninnyh territorij Severa Evrazii i ejo podgotovka dlja geologicheskogo rajonirovaniya (na primere Arhangel'skoj oblasti)*. (Selection of the basic digital elevation model (DEM) of the plain territories of the North of Eurasia and its preparation for geological zoning (on the example of the Arkhangelsk region). *Penza: «Sociosfera»*, 2019, 176 p.

11. Kutinov Yu. G., Chistova Z. B. *Ierarkhicheskii ryad proyavlenii shchelochno-ul'traosnovnogo magmatizma Arkhangel'skoi almazonosnoi provintsii. Ikh otrazhenie v geologo-geofizicheskikh materialakh* (A hierarchical series of manifestations of alkaline-ultra-basic magmatism of the Arkhangelsk diamond-bearing province. Their reflection in geological and geophysical materials) *Arkhangelsk: Pravda Severa*, 2004, 283 p.

12. Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Polyakova E. V., Mineev A. L. *Primenenie tsifrovyykh modelei rel'efa (TsMR) dlya vydeleniya tektonicheskikh struktur drevnikh platform (na primere severo-zapada Russkoi plity)* (The use of digital relief models (DEM) to highlight the tectonic structures of ancient platforms (in the example of the north-west of the Russian Plate). *Penza: «Sociosfera»*. 2020, 378 p.

13. Kuntcel' V. V., Semakov E. I., Korzhenevskij B. I., Simonova I. Ju. *Strukturno-tektonicheskie osobennosti Krymskogo regiona i ih vlijanie na jekzogennye geologicheskie processy* (Structural and tectonic features of the Crimean region and their impact on exogenous geological processes). *Geojekologija*, 1993, No. 6, pp. 94–99.

14. *Metallogeniya vostochnoj chasti Baltijskogo shhita* (Metallogeny of the eastern part of the Baltic Shield: 1977, 1978: Set of maps). Ed. T. V. Bilibina et al. Moscow: Ajerogeologija, 1979.
15. Sadovskij M. A. *Avtomodal'nost' geodinamicheskikh processov* (Automodality of geodynamic processes). Vest. AS USSR, 1986, No. 8, pp. 3—12.
16. Sadovskij M. A. *Izbrannye trudy. Geofizika i fizika vzryva* (Selected works. Geophysics and Explosion Physics). Moscow: Nauka, 2004, 440 p.
17. Sadovskij M. A., Pisarenko V. F. *Seismicheskij process v blokovej srede* (Seismic process in a block environment). Moscow: Nauka, 1991, 96 p.
18. *Shema zon glubinnyh razlomov territorii SSSR (po geofizicheskim dannym)* (Scheme of zones of deep faults of the territory of the USSR (according to geophysical data). Moscow, Mingeo USSR. E. M. Anan'eva et al. Ed. D. M. Mil'shtejn, 1979.
19. Judahin F. N., Francuzova V. I. *Sejsmichnost' Severa Evropejskoj chasti Rossii* (Seismicity of the North of the European part of Russia). Proceedings of conference. Arhangelsk: UB RAS, 2000, pp. 276—277.
20. Reily Shawn J., DeGloria Stephen D., Elliot Robert A *Terrain Ruggedness Index That Quantifies Topographic Heterogeneity*. Intermountain Journal of Science, 1999. V. 5 (1—4), pp. 23—27.

Поступила в редакцию / Received 04.08.2021