

УДК 550.36

ВЗАИМОСВЯЗЬ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В РЕГИОНАХ ОБРАМЛЕНИЯ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

М. Д. Хуторской¹, Г. Н. Антоновская², И. М. Басакина², Е. А. Тевелева¹

¹Геологический институт РАН,

Пыжевский пер. 7, 109017 Москва, Российская Федерация; mkhutorskoy@ginras.ru

²Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики УрО РАН,
наб. Северной Двины 23, 163000 Архангельск, Российская Федерация; ibasakina@yandex.ru

В работе рассматриваются геофизические параметры: тепловой поток и магнитуда землетрясений. В анализ вошли контрастные по структурно-геологическим условиям регионы периферии Восточно-Европейской платформы: в Западном секторе Арктики, Карпатский регион, Балканский и Рила-Родопский складчатые пояса, Большой и Малый Кавказ совместно с Северным и Средним Каспием. Показано существование антибатной связи между сейсмической активностью и тепловым потоком через величину магнитуды землетрясений, как для геодинамически активных зон, так и для асейсмичных регионов.

Ключевые слова: тепловой поток; сейсмичность; антибатная связь.

The paper considers geophysical parameters: heat flow and earthquake magnitude. The analysis included regions of the periphery of the Eastern European Platform contrasting in structural and geological conditions: in the Western sector of the Arctic, the Carpathian region, the Balkan and Rila-Rhodope folded belts, the Greater and Lesser Caucasus together with the Northern and Middle Caspian. It is shown that there is an anti-negative relationship between seismic activity and heat flow through the magnitude of earthquakes, both for geodynamically active zones and for aseismic regions.

Keywords: heat flow; seismicity; anti-negative relationship.

Введение. Оценить сейсмический риск, предвидеть начало сейсмической активности – является задачей первостепенной важности. Землетрясения происходят при разрыве сплошности среды, т. е. в хрупком, ригидном относительно холодном блоке, в котором должны наблюдаться пониженные температуры, сопровождающиеся низким тепловым потоком (ТП). Если же температура и ТП в литосфере высокие, то породы становятся более пластичными, дактильными, и при увеличении напряжённого состояния они флексуобразно деформируются без разрыва сплошности. В худшем случае это может вызвать незначительные по магнитуде сейсмические проявления. Таким образом, анализ регионального распределения ТП, а особенно зон резких горизонтальных изменений термических характеристик, может являться прогнозным признаком для оценки сейсмического риска того или иного блока литосферы, который считается сейсмически пассивным. В настоящее время представления о связи таких геофизических параметров как ТП и магнитуда землетрясений (M_w) подтверждается авторами многих публикаций.

В сейсмоактивных поясах Земли (Тихоокеанском и Альпийско-Гималайском), в которых происходит 96 % всех землетрясений, корреляционная связь ТП и сейсмичности отмечалась во многих работах. В работе [9] были использованы фокальные глубины более 1 000 землетрясений, произошедших в период с 1977 по 1983 гг. в районе Империял-Вэлли (Imperial Valley Region) южнее оз. Солтон-Си, для изучения взаимосвязей между глубиной сейсмичности, ТП и структурой земной коры. В частности, было высказано предположение о существовании связи региональных вариаций фокальной глубины землетрясений с ТП.

В работе [11] отмечено, что для северного района Кинки (Kinki) в Японии региональные вариации глубин более 8 000 землетрясений статистически значимо коррелируются с термической структурой земной коры.

В статьях [13, 14] подчёркивается, что глубина нижней границы сейсмоактивной зоны в Японии обратно пропорциональна величине ТП. Таким образом, температура литосферы является «фундаментальным параметром для определения толщины сейсмогенной зоны и глубин гипоцентров землетрясений...».

В работе [10] исследовалась термореологическая модель вязкоупругого полупространства с реологией Максвелла и температурно-зависимой вязкостью. Модель связывает поверхностный ТП с глубиной хрупко-пластичного перехода и толщиной сейсмогенного слоя. На примере района Гаргано (Gargano), Апулия, Италия, который часто подвержен сейсмической активности низкой магнитуды авторы, наблюдали изменение величины поверхностного ТП в соответствии с изменением глубины очагов землетрясений.

В данной работе мы исследовали связь геотермического и сейсмического режимов за пределами сейсмоактивных поясов в плитных и складчатых структурах обрамления Восточно-Европейской платформы (ВЕП) (рис.). Контрастные по структурно-геологическим условиям регионы в обрамлении ВЕП характеризуются высокой степенью изученности обоих параметров: ТП и современной сейсмичности.

Нами проведены сопоставления и статистическая обработка данных геотермических и сейсмических полей в Европейском секторе Арктического региона, в районах складчатых Карпат и Балкан-Родопы-Рила, а также Большого и Малого Кавказа совместно с Северным и Средним Каспием.

Методы исследований и базы данных. В работе за основу взяты сейсмические данные из каталога Международного сейсмологического центра (ISC) за период 1980–2018 гг., когда количество и расположение сейсмических станций стало удовлетворительным для надёжного определения параметров землетрясений. Для района Европейской Арктики информацию о землетрясениях мы дополнили сведениями из локального каталога Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики УрО РАН, составленного по данным Архангельской сейсмической сети.

Каталог ISC включает данные разных агентств, и по каждому землетрясению приводятся различные типы магнитуд (ML, mb, Mw и пр.). Для анализа данных нами были преобразованы разные типы магнитуд к моментной магнитуде Mw. После получения унифицированного каталога с магнитудами Mw, мы не рассматривали в выборке землетрясения с магнитудами меньше 3,0 для районов Карпат и Балкан-Родопы-Рила и 3,5 для Кавказско-Каспийского региона в силу преобладающего количества землетрясений. Исключением стал район Европейской Арктики в силу незначительного количества землетрясений с магнитудами более 3,0. Поэтому для этого района в анализ была включена вся имеющаяся информация о сейсмичности [8].

Для анализа контрастные по структурно-геологическим условиям исследуемые регионы периферии ВЕП были разбиты на структурно-тектонические элементы. В каждом элементе рассматривались сейсмические события и определялся ТП для данной координаты. Информация о значениях ТП была взята из международной базы по ТП [15] и, согласно ГИС-технологиям, нами построены карты пространственное его распределения по регионам (рис.). Для расчёта корреляционной связи ТП и сейсмичности мы определили средние значения каждого параметра внутри квадратов географической сетки, которая разбивалась на квадраты разного масштаба от $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ до $2^\circ \times 2^\circ$, в зависимости от фактических данных по тому или иному параметру. Статистическая значимость эмпирического коэффициента корреляции Пирсона определяется по формуле:

$$t_{эм} = \frac{|r|\sqrt{n-1}}{1-r^2} \quad (1)$$

Если значение $t_{эм}$ окажется больше критического значения t-критерия Стьюдента при числе степеней свободы $k = n-2$, где n – количество квадратов средних значений ТП и Mw при уровне значимости α , то коэффициент корреляции r считается значимым при доверительной вероятности $P = 1-\alpha$ [5]. Коэффициент корреляции считался не значимым при уровне доверительной вероятности $P < 0,5$. Для статистической обработки в массиве должно быть не менее 5 событий. Далее, были построены регрессионные зависимости Mw от ТП (q , мВт/м²) со значимым коэффициентом корреляции r . Таким образом, нами использовались два апробированных ресурса – ГИС-технологии и статистический анализ.

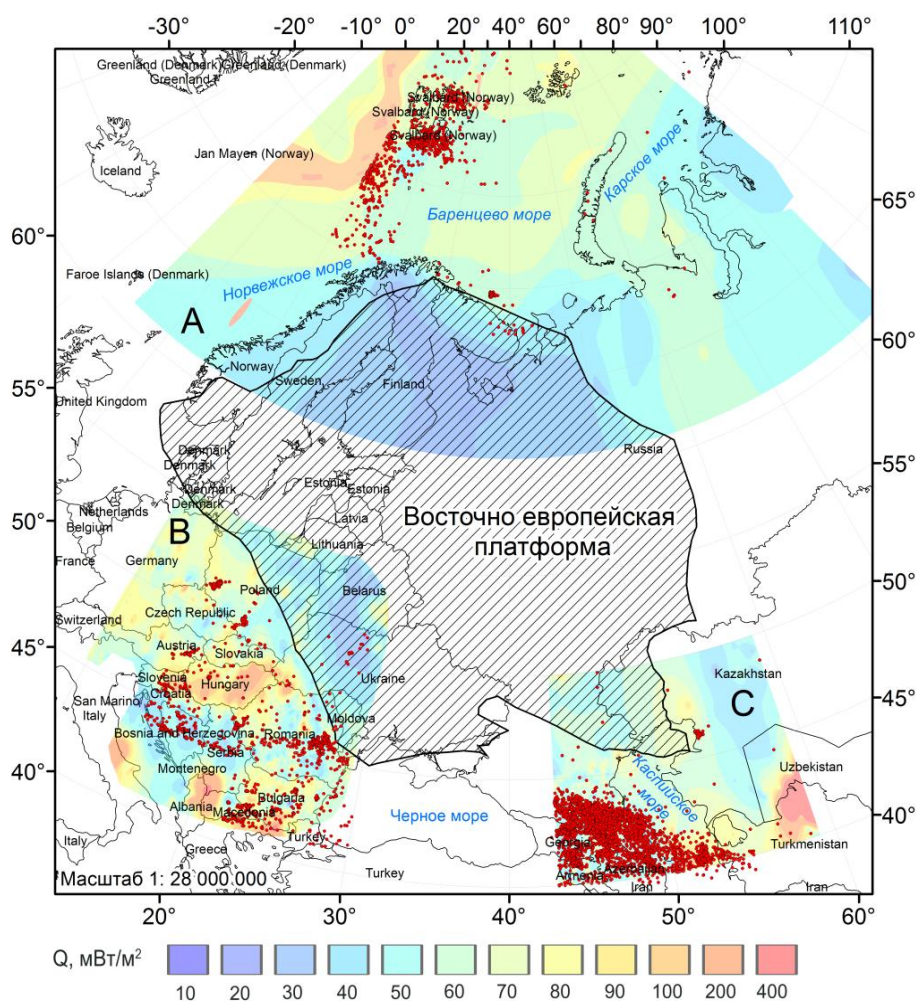


Рисунок – Распределение значений ТП в районах исследований

Буквами обозначены: А – Европейский сектор Арктического региона, В – район складчатых Карпат и Балкан-Родопы-Рила, С – район Большого Кавказа совместно с Северным и Средним Каспием.

Результаты исследований. Распределение значений ТП и сейсмичности с магнитудами $M_w > 3$ по регионам отражено графически на рис. Мы лишь вкратце остановимся на особенностях каждого региона.

Карпатский регион. Главная особенность теплового поля Карпатского региона – это постепенное повышение ТП от древней платформы к Альпийскому складчатому поясу – от внешних зон к Паннонскому бассейну. Плотность ТП изменяется здесь от 35 до 130 мВт/м². Относительная погрешность его определения в глубоких скважинах составляет 5–10 %.

Высоким ТП выделяются области проявления магматизма, известково-щелочного вулканизма ($90\text{--}130\text{ мВт/м}^2$) и андезитового вулканизма ($75\text{--}100\text{ мВт/м}^2$). Под Паннонским бассейном выявлена конфигурация зоны утонения литосферы [6]. Термальная активизация Паннонской и Закарпатской впадин проявлена высоким кондуктивным ТП, а также выходами термальных источников и проявлениями позднекайнозойского вулканизма с подземными флюидами мантийного гелия. В Закарпатском прогибе цепочками землетрясений хорошо прослеживаются сейсмически активные в настоящее время вертикальные разломы, служившие в миоцене каналами подвода магм для Выгорлат-Гутинской вулканической гряды и других вулканических структур в регионе.

В северной части Западных Карпат на границе Польши и Словакии относительно низкий ТП ($<50\text{ мВт/м}^2$) и высокая плотность землетрясений с магнитудой до 3,8.

Отметим зону Вранча в Румынии на сочленении Восточных и Южных Карпат. Здесь ТП не превышает 40 мВт/м^2 , а землетрясения за рассматриваемый временной интервал проявляются часто, их магнитуда достигает 4,5–5, очаги землетрясений расположены в консолидированной коре и в верхней мантии на глубинах 80–160 км [4]. Для зоны Вранча наблюдается перерыв между коровыми и мантийными землетрясениями, при этом значения ТП находятся в пределах $40\text{--}55\text{ мВт/м}^2$.

Ареалы углеводородных месторождений в пределах Паннонского бассейна совпадают с высокими значениями ТП ($\geq 200\text{ мВт/м}^2$), в которых практически отсутствуют сейсмические события. Закарпатский внутренний прогиб характеризуется повышенными значениями ТП ($90\text{--}118\text{ мВт/м}^2$), при этом землетрясения происходят на глубинах 12,9–16,1 км. Для Пенинской (Утёсовой) зоны, где коровые землетрясения происходят в основном на глубинах 8–13 км, наблюдается разброс значений ТП от 54 до 115 мВт/м^2 . Для Мизийской плиты большая часть землетрясений происходит на глубинах 8–18 км, а преобладающие значения ТП $35\text{--}55\text{ мВт/м}^2$.

Балканский и Рила-Родопский складчатые пояса. За рассматриваемый период сейсмических наблюдений крупных разрушительных землетрясений с $M_w > 6$ в районе Балканского-Рила-Родопского складчатого пояса не наблюдалось. Балканский складчатый пояс, особенно его восточная Причерноморская часть, а также Рила-Родопский срединный массив и сейчас являются наиболее сейсмически активными. Анализ глубины гипоцентров землетрясений за тот же период наблюдений показал, что наиболее глубокофокусные события приурочены к районам Мизийской плиты в пределах Болгарии и Румынии и прилегающей акватории Чёрного моря. Литосфера более прогрета в районе Родопского массива, и там переход от ригидного к дактильному состоянию вещества происходит на меньшей глубине, чем в районах Мизийской плиты и Черноморской впадины. По-видимому, с этим связаны меньшие глубины гипоцентров в Родопах [12].

Большой и Малый Кавказ совместно с Северным и Средним Каспием. Прикаспийская впадина относится к регионам со слабой сейсмичностью [2, 3]. Так, за временной период с 1980 по 2017 гг. здесь зафиксировано немногим более 200 землетрясений с моментной магнитудой более 3,5. Значения ТП для этой территории варьируются в среднем от 40 до 62 мВт/м^2 . Сейсмичность в пределах Среднего Каспия распределена неравномерно с существенным преобладанием к его южной части (M_w до 6,3), относящейся к Терско-Каспийскому прогибу. Преобладающая часть землетрясений, сосредоточенных на глубинах до 20 км, характеризуется ТП, находящимся в диапазоне от 30 до 100 мВт/м^2 , на глубинах 45–55 км – значениями ТП от 70 до 85 мВт/м^2 . Для глубокофокусных землетрясений (до 160 км), приуроченных исключительно к Терско-Каспийскому прогибу, характерно различие величин ТП: невысокие значения – $35\text{--}50\text{ мВт/м}^2$, средние – $65\text{--}90\text{ мВт/м}^2$, максимальные – 145 мВт/м^2 – в области сочленения Терско-Каспийского прогиба с Южно-Каспийской впадиной, где широко проявлены углеводородные структуры.

Геотермическое поле региона Северного Кавказа тесно связано с тектоническим строением и историей геологического развития. Минимальные измеренные значения ТП приурочены к докембрийским выступам фундамента – например, Ростовский выступ ВЕП, Терско-Каспийский прогиб. В этих районах значения ТП изменяются от 36 до 60 мВт/м². Максимальный ТП фиксируется в мегантиклинории Большого Кавказа, а также в структурах транскавказского простираия: Минераловодском, Майкопском выступах, где ТП достигает 80–100 мВт/м² (рис.).

Структуры Кавказа обладают большой тектонической неоднородностью, что обуславливает также неоднородность ТП. Из-за этого на границах тектонических зон длительное время существуют полосы резких горизонтальных температурных градиентов. Они создают термоупругие напряжения, которые обуславливают живучесть глубинных разломов кавказского и транскавказского простираий. Для Большого Кавказа значения ТП в среднем находятся в диапазоне от 35 до 60 мВт/м², максимальные значения достигают 100 мВт/м². Для Малого Кавказа значения ТП сосредоточены в диапазоне от 35 до 60 мВт/м². Различия наблюдаются в гипоцентрах землетрясений. Для Малого Кавказа землетрясения происходят на глубинах до 20 км, для Большого Кавказа – это, в т. ч., глубокофокусные события – до 100 км.

Аналогично Карпатскому региону наблюдаются проявления антибатной связи между исследуемыми параметрами. Наиболее сильная антибатная связь характерна для Северного Каспия, в области Прикаспийской впадины и Южного Каспия в пределах Апшерон-Прибалханской системы (табл.).

Таблица – Результат корреляционной связи ТП и Mw

Регион	Квадрат, °	n	r	P	Уравнение регрессии
Карпатская складчатая обл.	0,1×0,1	36	-0,35	0,97	Mw = -0,005q + 5,93
Паннонский массив	0,25×0,25	21	-0,48	0,98	Mw = -0,019q + 5,39
Закарпатский внутренний прогиб	–	11	-0,31	0,68	Mw = -0,008q + 5,48
Мизийская плита	0,1×0,1	14	-0,41	0,90	Mw = -0,015q + 4,40
Рила Родопа	1×1	17	-0,42	0,94	Mw = -0,006q + 4,59
Восточно-Европейская платформа	1×1	27	-0,37	0,95	Mw = -0,015q + 4,77
Прикаспийская впадина	0,25×0,25	12	-0,46	0,92	Mw = -0,004q + 5,00
Среднекаспийская синеклиза: Скифская плита	0,1×0,1	17	-0,20	0,59	Mw = -0,005q + 5,09
Песчаномысская зона поднятий	0,5×0,5	–	-0,33	0,94	Mw = -0,003q + 4,99
Большой Кавказ (до 42,5° в. ш.)	0,5×0,5	32	-0,32	0,94	Mw = -0,008q + 5,07
Курунская впадина	0,5×0,5	33	-0,33	0,96	Mw = -0,018q + 5,09
Аджаро-Триалетская складчатая зона	0,05×0,05	22	-0,28	0,87	Mw = -0,009q + 4,96
Кусаро-Дивичинский прогиб	0,1×0,1	22	-0,24	0,74	Mw = -0,042q + 6,23
Малый Кавказ	0,1×0,1	18	-0,38	0,91	Mw = -0,002q + 5,42
Апшерон-Прибалханская система поднятий	0,1×0,1	29	-0,28	0,89	Mw = -0,001q + 4,92

Европейский сектор Арктики. Изучение современной сейсмичности Арктического региона, простирающегося от рифтового хребта Книповича (на западе) до Северной Земли (на востоке), включая окраины Евразийского континента и архипелаги, продемонстрировало пространственное совпадение участков концентрации эпицентров землетрясений и зон резкого изменения значений ТП [1, 7]. В Арктическом регионе пока отсутствует представительная база сейсмических данных для расчёта корреляционной связи ТП и Mw, считаем – в силу слабой сейсмичности региона и редкой сети сейсмических станций. Тем не менее, для ряда шельфовых землетрясений гипоцентры сосредоточены до 20 км. Преобладающие значения ТП находятся в диапазоне от 60 до 80 мВт/м². Предполагаем, что антибатная связь между значениями ТП и Mw существует и в Арктическом регионе.

В табл. приведены результаты корреляционной связи через уравнения регрессии, что позволяет для этих структур оценить ожидаемую сейсмическую активность в зависимости от геотермического режима на количественном уровне.

Выводы. В краевых зонах Восточно-Европейской платформы, на границах рассматриваемых регионов отмечаем низкие значения ТП (30–50 мВт/м²). Преобладающая часть землетрясений Карпатского, Рила-Родопского и Кавказско-Каспийского регионов относится к коровым, гипоцентры которых сосредоточены в основном на глубинах до 20 км. Глубокофокусные землетрясения приурочены к складчатым областям зоны Вранча и Большого Кавказа, а также Терско-Каспийского прогиба. В районах с повышенным значением ТП (более 70 мВт/м²) практически отсутствуют коровые землетрясения.

Все эти регионы разнотипны по своему глубинному строению, по истории геологического развития, интенсивности сейсмических проявлений и ТП, но для всех них характерна антибатная зависимость сейсмической активности, выраженной величиной Mw, и ТП, даже в асейсмичных районах.

Библиографические ссылки

1. Антоновская Г. Н., Басакина И. М., Конечная Я. В. Распределение сейсмичности и аномалии теплового потока Баренцевоморского региона // Геотектоника. 2018. № 1. С. 52–62.
2. Дальян И. Б., Посадская А. С. Геология и нефтегазоносность восточной окраины Прикаспийской впадины. Алма-Ата : Наука, 1972.
3. Жеваго В. С. Геотермия и термальные воды Казахстана. Алма-Ата : Наука, 1972.
4. Уломов В. И. Прогноз сейсмических проявлений в Москве при землетрясениях в зоне Вранча // Физика Земли. 2010. № 1. С. 3–20.
5. Фастовец Н. О., Попов М. А. Математическая статистика. М. : Нефть и газ, 2012.
6. Хуторской М. Д., Поляк Б. Г. Геотермические модели геодинамических обстановок разного типа // Геотектоника. 2014. № 1. С. 77–96.
7. Хуторской М. Д., Антоновская Г. Н., Басакина И. М., Кременецкая Е. О., Кваерна Т. Сейсмичность, тепловой поток и тектоника Западно-Арктического бассейна // Мониторинг. Наука и технологии. 2015. № 3(24). С. 23–32.
8. Antonovskaya G. N., Basakina I. M., Vaganova N. V., Kapustian N. K., Konechnaya Ya. V., Morozov A. N. Spatiotemporal Relationship between Arctic Mid-Ocean Ridge System and Intraplate Seismicity of the European Arctic [Электрон. ресурс] // Seismol. Res. Letters. 2021. Vol. 92, N 5. P. 2876–2890. URL: <https://doi.org/10.1785/0220210024> (дата обращения: 1.12.2021).
9. Doser D. 1., Kanamori H. Depth of seismicity in the Imperial Valley region (1977–1983 and its relationship to heat flow, crustal structure, and the October 15, 1979 earthquake // J. of Geophys. Res. 1986. Vol. 91, N 81. P. 675–688.
10. Filippucci M., Tallarico A., Dragoni M., de Lorenzo S. Relationship between depth of seismicity and heat flow: the case of the Gargano area (Italy) // Pure Appl. Geophys. 2019. Vol. 176. P. 2383–2394.
11. Ito A. Earthquake swarm activity revealed from high-resolution relative hypocenters – clustering of microearthquakes // Tectonophysics. 1990. Vol. 175. P. 47–66.
12. Khutorskoy M., Kostova N., Hristov V., Benderev A. Heat flow and depth temperatures in the earth crust of Bulgaria based on numerical modeling // Rev. of the Bulg. Geol. Soc. 2019. Vol. 80, Pt. 2. P. 443–452.
13. Tanaka A. Geothermal gradient and heat flow data in and around Japan (II): Crustal thermal structure and its relationship to seismogenic layer // Earth Planets Space. 2004. Vol. 56. P. 1195–1199.
14. Tanaka, A., Yamano M., Yano Y., Sasada M. Geothermal Gradient and Heat Flow Data in and around Japan, Digital Geoscience Map DGM P-5, Geological Survey of Japan, 2004.
15. The Global Heat Flow Database of the International Heat Flow Commission. Site Provided by the University of North Dakota [Электрон. ресурс]. URL: <http://www.ihfc-iugg.org/products/global-heat-flow-database> (дата обращения: 1.12.2021).