

УДК 550.361.44:550.836

## РАДИОГЕННАЯ ТЕПЛОГЕНЕРАЦИЯ В ПОРОДАХ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА БЕЛАРУСИ

В. И. ЗУЙ<sup>1)</sup>, Е. И. ЛОСЕВА<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Научно-производственный центр по геологии, ул. Академика Купревича, 7, 220084, г. Минск, Беларусь

Плотность теплового потока – наиболее важный параметр, характеризующий термический режим литосферы. Распределение плотности теплового потока в земной коре и верхней мантии меняется с глубиной. Формирование потока включает два одновременных процесса: поступление первой его части из мантии в основание коры, а также генерацию второй части в породах, слагающих земную кору, за счет распада радиоактивных изотопов. Этот процесс известен как производство радиогенного тепла. Основную часть теплогенерации в земной коре обеспечивают долгоживущие изотопы урана, тория и калия. Другие радиоактивные изотопы учитываются редко. Большинство исследователей не принимают во внимание теплопродукцию в пределах неглубокого осадочного чехла, перекрывающего земную кору. Территория Беларуси относится к докембрийской Восточно-Европейской платформе. Ее кристаллический фундамент перекрыт достаточно тонкими отложениями. В нем пробурен ряд скважин по неравномерной сети. Из поднятого керна отобраны более 420 образцов горных пород кристаллического фундамента, которые исследованы в целях определения концентрации долгоживущих радиоактивных изотопов в лабораторных условиях с помощью гамма-радиометра РУГ-91М «Адани». Уровень расчетной теплогенерации варьирует в широких пределах с тенденцией к более высоким значениям у кислых кристаллических пород. Намного меньшие показатели тепловыделения характерны для пород основного состава. На практике возможно получение образцов породы только для самых верхних вскрытых бурением горизонтов земной коры. В связи с отсутствием образцов кристаллических пород для всего разреза земной коры широко используются несколько моделей изменения количества теплопродукции с глубиной исходя из значений скорости продольных сейсмических волн.

**Ключевые слова:** геотермия; тепловой поток; долгоживущие радиоактивные изотопы; теплогенерация; радиометр.

---

### Образец цитирования:

Зуй ВИ, Лосева ЕИ. Радиогенная теплогенерация в породах кристаллического фундамента Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2023;2:90–104.

EDN: UUZHEB

### For citation:

Zui VI, Loseva EI. Radiogenic heat production from rocks of the crystalline basement within Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2023;2:90–104. Russian.

EDN: UUZHEB

---

### Авторы:

**Владимир Игнатьевич Зуй** – доктор геолого-минералогических наук, профессор; профессор кафедры региональной геологии факультета географии и геоинформатики.

**Елизавета Ивановна Лосева** – младший научный сотрудник.

### Authors:

**Vladimir I. Zui**, doctor of science (geology and mineralogy), full professor; professor at the department of regional geology, faculty of geography and geoinformatics.

*zui@bsu.by*

**Elisaveta I. Loseva**, junior researcher.

## RADIOGENIC HEAT PRODUCTION FROM ROCKS OF THE CRYSTALLINE BASEMENT WITHIN BELARUS

V. I. ZUI<sup>a</sup>, E. I. LOSEVA<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

<sup>b</sup>Research and Production Center for Geology, 7 Akademika Kuprevicha Street, Minsk 220084, Belarus

Corresponding author: V. I. Zui (zui@bsu.by)

Heat flow density is the most representative parameter characterising the lithospheric thermal regime. Its formation includes two simultaneous processes: the entry of its first part from the mantle into the base of the crust, as well as the generation of the second part in rocks that make up the Earth's crust due to the decay of radioactive isotopes. It is known as a radiogenic heat production. The main part of the production rate within the crust is the decay of long living isotopes of Uranium, Thorium and Potassium. Other radioactive isotopes are taken into account seldom. Most researchers don't take into account also the heat production within shallow sedimentary cover overlying the crust. The territory of Belarus belongs to the Precambrian East European Platform. Its crystalline basement is hidden under rather thin sediments. A number of irregularly spaced boreholes were drilled into the crystalline basement. More than 420 rock samples of crystalline rocks were collected from their drill cores and analysed for the concentration of long living radioactive isotopes in laboratory conditions using the RUG-91M «Adani» gamma-radiometer. The calculated heat production is varied in a wide range with the tendency of its higher values for acid crystalline rocks. Considerably lower heat generation relates to rocks of basic composition. In practice it is possible to get rock samples only for the uppermost drilled horizons of the crust. Due to a lack of crystalline rock samples for deeper horizons, several models of heat production variation with depth derived from seismic velocities are widely used for the whole crustal section.

**Keywords:** geothermics; heat flow; long living radioactive isotopes; heat production; radiometer.

### Введение

Территория Беларуси относится к докембрийской Восточно-Европейской платформе. На большей площади страны, за исключением Припятского прогиба, восточной части Подляско-Брестской впадины и Оршанской впадины, кристаллический фундамент перекрыт тонким (первые сотни метров) платформенным чехлом. В пределах впадин мощность осадочной толщи возрастает до 1,0–1,7 км, и только в наиболее погруженных блоках Припятского прогиба она достигает 4–5 км и в нескольких случаях 6 км [1; 2].

Тепловой режим земной коры в частности и литосферы в целом тесно связан с тектоникой и геодинамикой рассматриваемого региона. Основными параметрами теплового поля региона являются наблюдаемые температура, геотермический градиент и плотность теплового потока. Последняя относится к наиболее важным свойствам, определяющим тепловой режим земной коры и верхней мантии, и рассматривается как одна из значимых характеристик, которые идентифицируют особенности геолого-тектонического строения и геодинамики региона [3]. Формирование теплового потока в земной коре включает два одновременных процесса: поступление первой его части из мантии в подошву земной коры и генерацию второй части породами, слагающими кору и содержащими изотопы радиоактивных элементов. Их спонтанный распад сопровождается выделением радиогенного тепла – радиогенной теплогенерацией. Она обеспечивается в основном долгоживущими изотопами урана, тория и калия. Другие радиоактивные элементы вносят незначительный вклад в особенности теплового поля коры и в подавляющем большинстве случаев не рассматриваются [4].

Значение плотности теплового потока, идущего из земных недр, является важнейшим индикатором геодинамической активности структур литосферы как на современном этапе их развития, так и в геологическом прошлом. Для расчета распределения температуры в разрезе литосферы и мантийного теплового потока разработаны три основные модели изменения интенсивности теплогенерации с глубиной – ступенчатая, линейная и экспоненциальная [5]. Известны и другие модели, например послойная. В каждом случае отправным параметром считается значение радиогенной теплогенерации консолидированной земной коры в ее верхних слоях (у земной поверхности). В результате этот параметр является одним из наиболее важных при построении моделей геодинамических обстановок.

### Методика определения уровня радиогенной теплогенерации

Для определения показателей генерации радиогенного тепла были проанализированы более 420 образцов горных пород различного состава, отобранных из керна скважин, с помощью которых была вскрыта верхняя часть кристаллического фундамента Беларуси [6]. В целом с учетом определений, выполненных в конце прошлого столетия, количество образцов, исследованных на содержание изотопов

урана, тория и калия, достигло около 600 ед. Они отобраны из керна скважин, которые были пробурены в пределах Беларуси и вскрыли кристаллический фундамент Белорусской антеклизы, Припятского прогиба, белорусской части Подляско-Брестской впадины, Полесской седловины и Оршанской впадины. Небольшое количество образцов изучено в западной части России (8 образцов из скважин «Лобно», «Орел», «Смоленск», «Ярцево», «Рославль», «Серебрянка» и «Мишина гора»), а также в Балтийской синеклизе на территории Литвы (12 образцов из скважин «Варена-Лт-982» и «Видмантай-1»).

Отбор кернового материала на территории Беларуси выполнялся начиная с конца 1960-х до конца 1990-х гг., на территории России и Литвы – в основном в течение 1970–90-х гг. Плотная сеть скважин, с помощью которых был вскрыт кристаллический фундамент, относится к центральной части Белорусской антеклизы и Микашевичско-Житковичскому выступу фундамента. Слабо изученными методом глубокого бурения остаются Оршанская впадина и ее продолжение в России. Большинство имевшихся в распоряжении образцов были извлечены из керна скважин, пробуренных в Белорусской антеклизе, значительно меньшее количество образцов – из керна скважин, расположенных в Припятском прогибе. Кристаллические породы фундамента Оршанской впадины представлены менее чем 10 образцами, отобранными из скважин, которые пробурены как на белорусской, так и на российской стороне впадины. Наименее изучен фундамент Подляско-Брестской впадины.

Распределение скважин отражено на рис. 1. Такие массовые исследования проводились в Беларуси впервые. В 1980-х гг. по инициативе Л. А. Цыбули и М. С. Жука в научных институтах России (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А. П. Карпинского, Всесоюзный научно-исследовательский институт ядерной геофизики и геохимии) и Украины (Институт геофизики имени С. И. Субботина НАН Украины) было определено содержание радиоактивных изотопов в единичных образцах кристаллических пород.

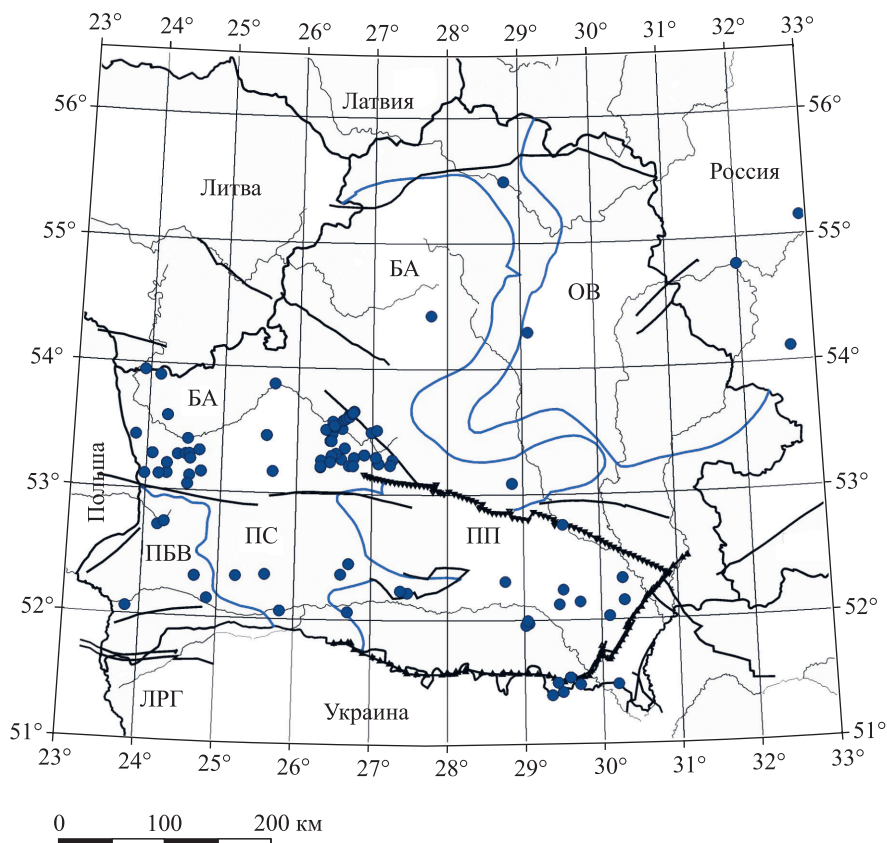


Рис. 1. Распределение скважин, из которых были отобраны образцы керна для изучения их радиогенной теплогенерации (БА – Белорусская антеклиза; ЛРГ – Луковско-Ратновский горст; ОВ – Оршанская впадина; ПБВ – Подляско-Брестская впадина; ПС – Полесская седловина; ПП – Припятский прогиб)

Fig. 1. Distribution of boreholes from which core samples were taken to study of their radiogenic heat production (BA – Belarusian Anticline; LRH – Lukow-Ratno Horst; OD – Orsha Depression; PBD – Podlasie – Brest Depression; PS – Polesian Saddle; PT – Pripyat Trough)

Определение концентрации изотопов урана, тория и калия проводилось на гамма-радиометре РУГ-91М «Адани» (научно-производственное частное предприятие «Адани», Беларусь)<sup>1</sup> (рис. 2, а). Принцип его действия основан на анализе амплитудного распределения световых импульсов, возникающих в сцинтилляционном детекторе при попадании в него гамма-квантов.



Рис. 2. Общий вид гамма-радиометра РУГ-91М «Адани» (а) и его внутренний вид при снятом сосуде Маринелли (б)  
Fig. 2. General view of the RUG-91M «Adani» gamma radiometer (a) and its internal view with the Marinelli vessel removed (b)

Гамма-радиометр РУГ-91М «Адани» предназначен для экспрессного определения по гамма-излучению удельной и объемной активности радионуклидов естественного происхождения  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  с индикацией абсолютных статистических погрешностей измерения и вычислением суммарной удельной эффективной активности для широкого класса исследуемых образцов (в воде, почве, продуктах питания, продукции животноводства и растениеводства, сырье и материалах, строительных материалах, горных породах, лесо- и пиломатериалах, хлопчатобумажных тканях, сухих травах)<sup>2</sup> [7].

Верхняя часть прибора имеет поворотную свинцовую крышку, обеспечивающую доступ к сцинтиллятору. В качестве детектора гамма-квантов используется кристалл  $\text{NaI}(\text{Tl})$  размером  $40 \times 40$  мм, заключенный в круговую свинцовую обойму. Измельченный образец горной породы помещается в специальную кювету (сосуд Маринелли) объемом 0,5 л, которая облегает кристалл детектора. Кюветы с пробой устанавливаются в свинцовый защитный экран, который перед началом измерений закрывается свинцовой крышкой, уменьшающей влияние внешнего фонового излучения<sup>3</sup> (рис. 2, б). Доступ к анализируемой пробе обеспечивается открытием поворотной части свинцовой крышки. Свинцовая защита прибора и его поворотной крышки заключена в металлический корпус.

Световые вспышки через световод попадают на фотокатод фотоэлектронного умножителя и преобразуются в электрические сигналы, которые после усиления поступают в блок селекции импульсов<sup>4</sup> (рис. 3). В блоке селекции импульсов выполняется сортировка импульсов по 256 амплитудным каналам, тем самым измеряется их амплитудное распределение пропорционально энергии регистрируемых гамма-квантов. В блоке обработки импульсов анализируются значения распределений и вычисляется активность анализируемых радионуклидов, он управляет работой блока селекции импульсов и устанавливает количественные характеристики ионизирующего излучения. Это позволяет определять вклады изотопов тория и калия в суммарную активность пробы. Природный уран лишь на 0,72 % состоит из изотопа  $^{235}\text{U}$ , тогда как 99,27 % от его структуры составляет изотоп  $^{238}\text{U}$  [8]. В связи с незначительным процентным содержанием изотопа  $^{235}\text{U}$  в общем уране в природной среде уровень его теплогенерации не учитывался. Активность 1 г нуклида  $^{238}\text{U}$  является низкой и составляет приблизительно 12,5 кБк, что осложняет его выявление гамма-радиометром РУГ-91М «Адани», поэтому концентрация изотопа  $^{238}\text{U}$  определялась по содержанию продукта его распада – изотопа  $^{226}\text{Ra}$ .

<sup>1</sup>Гамма-радиометры РУГ-91М-2 «Адани»: описание типа средств измерений для Гос. реестра средств измерений [Электронный ресурс]. URL: <http://media.belgim.by/grsi/9894.pdf> (дата обращения: 25.05.2023); Гамма-радиометр РУГ-91М [Электронный ресурс]. URL: <http://forum.rhbz.org/topic.php?forum=2&topic=174> (дата обращения: 25.05.2023).

<sup>2</sup>Гамма-радиометр РУГ-91М [Электронный ресурс]. URL: <http://forum.rhbz.org/topic.php?forum=2&topic=174> (дата обращения: 25.05.2023).

<sup>3</sup>Гамма-радиометр РУГ-91М [Электронный ресурс]. URL: <http://forum.rhbz.org/topic.php?forum=57&topic=337> (дата обращения: 25.05.2023).

<sup>4</sup>Функциональная схема гамма-радиометра [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/7083546/page:5> (дата обращения: 25.05.2023).

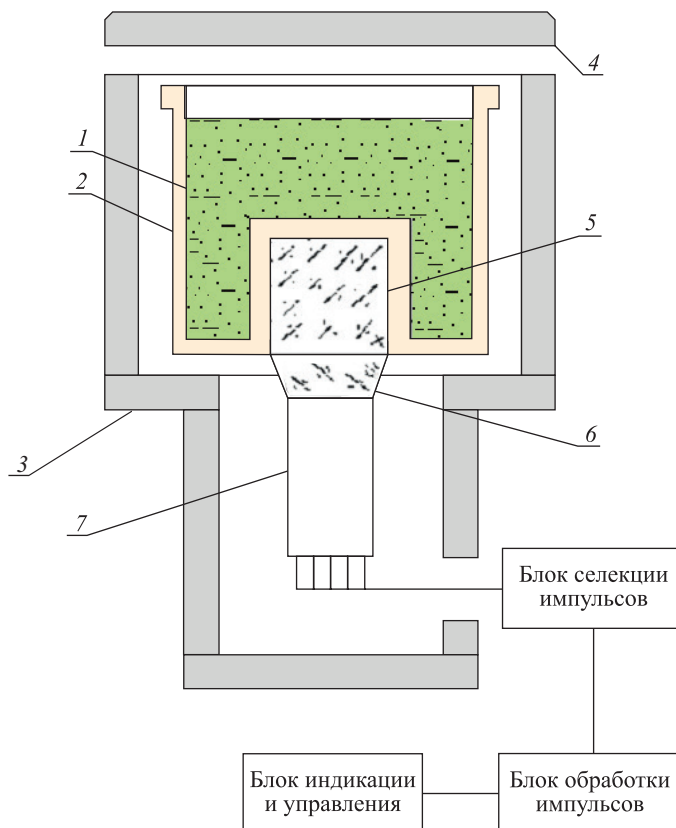


Рис. 3. Упрощенная функциональная схема гамма-радиометра РУГ-91М «Адани»:

1 – исследуемый образец (проба); 2 – кювета (сосуд Маринелли);  
3 – защитный свинцовый экран; 4 – поворотная свинцовая крышка;  
5 – сцинтиллятор NaI(Tl); 6 – световод; 7 – фотоэлектронный умножитель

Fig. 3. Simplified functional diagram of the RUG-91M «Adani» gamma radiometer:

1 – test sample (sample); 2 – cuvette (Marinelli vessel);  
3 – protective lead screen; 4 – rotary lead cover;  
5 – NaI(Tl) scintillator; 6 – light guide; 7 – photomultiplier

Процесс измерений начинается после помещения раздробленного образца внутрь прибора, закрытия крышки и включения радиометра. Продолжительность регистрации в значительной степени зависит от активности изучаемого образца, для малоактивных проб время измерения может достигать до нескольких десятков минут. Принцип действия гамма-радиометра основан на подсчете числа световых импульсов, возникающих в сцинтилляционном детекторе, при попадании на него гамма-квантов. Число зарегистрированных в единицу времени световых импульсов однозначно связано с активностью исследуемого образца.

Для повышения эффективности регистрации световых импульсов, возникающих в сцинтилляторе при попадании в него гамма-квантов от исследуемого образца, кювета с пробой устанавливается в свинцовый защитный экран под закрытой свинцовой крышкой, уменьшающей влияние внешнего фонового излучения.

Блок индикации и управления определяет режимы работы прибора и показывает результаты измерения. Режим работы гамма-радиометра задается с помощью 14 кнопок на его передней панели (см. рис. 2, а). Результаты измерений отображаются на двух жидкокристаллических индикаторах. В левом окне показывается значение удельной активности, а в правом – значение погрешности измерения. В левом окне индицируется также масса пробы (в кг)<sup>5</sup>.

Измерения каждого образца (как правило, продолжительностью по 30 мин) выполнялись дважды. Относительная погрешность при этом составляла обычно 10–25 %. До 50 % она увеличивалась при низких значениях активности (от 3 до 10 Бк/кг)<sup>6</sup>.

<sup>5</sup>Функциональная схема гамма-радиометра... ; Назначение и технические характеристики [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/9899020/page:24> (дата обращения: 25.05.2023).

<sup>6</sup>Гамма-радиометры РУГ-91М-2 «Адани»...

## Радиоактивные элементы в породах кристаллического фундамента Беларуси

Содержание радиоактивных элементов и величина теплогенерации в породах кристаллического фундамента Беларуси прямо связаны с их минеральным и химическим составом. Сведения о названиях и номерах скважин, из которых отбирались анализируемые образцы, о результатах измерений по урану, торию и калию в единицах удельной активности (в Бк/кг) и концентрации (в г/т), а также о типе горной породы и ее плотности вносились в таблицу формата *Excel*. Далее вычислялся уровень радиогенной теплогенерации (в мкВт/м<sup>3</sup>). Пример компиляции исходных и полученных данных приведен в табл. 1 для ряда скважин, с помощью которых был вскрыт кристаллический фундамент в центральной части Беларуси (лист карты N-35-XXI (Столбцы)).

Пересчет значений активности каждого элемента в значения массовой концентрации осуществлялся по формуле

$$Q = 2,8 \cdot 10^{-6} A \cdot T,$$

где  $Q$  – масса радиоактивного элемента (в граммах), активность которого равна 1 Ки;  $A$  – атомная масса, г;  $T$  – период полураспада, лет [9].

С учетом того что 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк, в результате необходимых вычислений были получены следующие значения: 1 Бк  $^{238}\text{U}$  =  $8,1013 \cdot 10^{-5}$  г; 1 Бк  $^{232}\text{Th}$  =  $2,4386 \cdot 10^{-4}$  г; 1 Бк  $^{40}\text{K}$  =  $3,9654 \cdot 10^{-6}$  г.

Известно, что калий состоит из трех изотопов: радиоактивного изотопа  $^{40}\text{K}$  (0,012 %) и стабильных изотопов  $^{39}\text{K}$  (93,258 %) и  $^{41}\text{K}$  (6,730 %) <sup>7</sup>.

Уровень генерации радиогенного тепла вычислялся по формуле

$$H\sigma = (a \cdot U + b \cdot \text{Th} + c \cdot \text{K}),$$

где  $H$  – количество выделенного тепла в 1 м<sup>3</sup> породы, мкВт;  $\sigma$  – плотность породы, кг/м<sup>3</sup>;  $U$ ,  $\text{Th}$  и  $\text{K}$  – значения концентрации радиоактивных элементов урана, тория и калия соответственно, определяемые отношением массы радиоактивных изотопов к общей массе горной породы;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – пересчетные коэффициенты, равные  $9,73 \cdot 10^{-5}$ ;  $2,63 \cdot 10^{-5}$  и  $3,57 \cdot 10^{-9}$  Вт/кг соответственно [10].

Значения распределения суммарной радиогенной теплогенерации, создаваемой изотопами урана, тория и калия, приведены на рис. 4. Около 10 одиночных образцов, показатели теплогенерации которых больше 10 мкВт/м<sup>3</sup>, на графике не отображены.

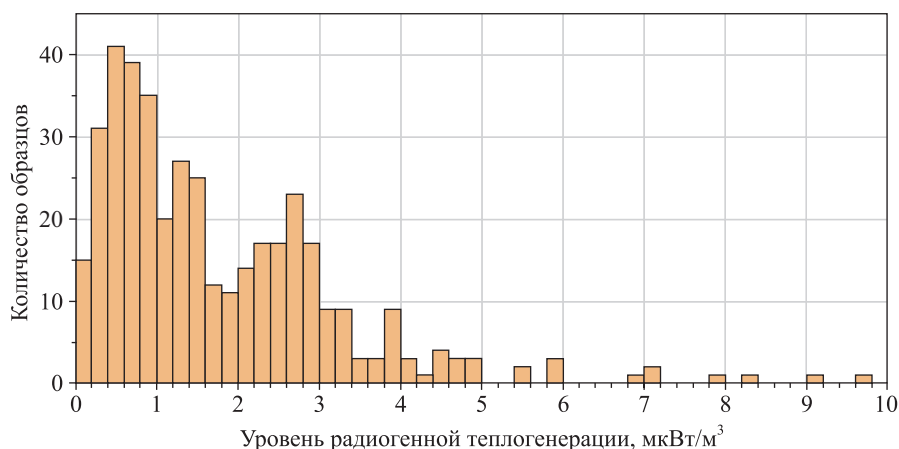


Рис. 4. Распределение радиогенной теплогенерации в породах кристаллического фундамента Беларуси

Fig. 4. The distribution of radiogenic heat generation in rocks of the crystalline basement of Belarus

Наибольшее количество изученных образцов горных пород (около 148) имеют значения теплогенерации от 0,2 до 1,0 мкВт/м<sup>3</sup>. Они извлечены из скважин, расположенных в центральной части Белорусской антеклизы – древней структуры докембрийского возраста, самая верхняя часть кристаллического фундамента которой, вероятно, была эродирована и размывта. Образцы, отобранные из скважин, которые пробурены в структурах палеозойского возраста (Припятский прогиб и восточная часть Подляско-Брестской впадины), обладают повышенными показателями теплогенерации (1–3 мкВт/м<sup>3</sup>), однако здесь изучено значительно меньше образцов керна.

<sup>7</sup>Isotopes of potassium [Electronic resource]. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes\\_of\\_potassium](https://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes_of_potassium) (date of access: 25.05.2023).

Пример сводки данных

An example of the data summary

№ п/п	Скважина	<sup>238</sup> U, Бк/кг	<sup>238</sup> U, г/т	<sup>232</sup> Th, Бк/кг	<sup>232</sup> Th, г/т	<sup>40</sup> K, Бк/кг	<sup>40</sup> K, г/т
1	СТ-147-223,5	31,1	2,52	12,2	2,97	130,5	0,52
2	СТ-147-226	21,8	1,77	11,7	2,85	0	0
3	СТ-194-333,3	25,7	2,08	12,2	2,97	203,2	0,80
4	СТ-212-114	31,2	2,53	8,8	2,14	284,5	1,13
5	СТ-220-313	30,6	2,48	19,5	4,75	222,4	0,88
6	СТ-220-340	55,7	4,51	26,2	6,39	357,2	1,42
7	СТ-227-187,5	22,9	1,85	13,0	3,17	0	0
8	СТ-231-121	39,1	3,17	42,6	10,39	1053,0	4,17
9	СТ-234-137,5	19,3	1,56	8,7	2,12	0	0
10	СТ-235-131	39,3	3,18	35,9	8,75	898,9	3,56
11	СТ-239-240	7,6	0,61	3,9	0,95	0	0
12	СТ-239-294	34,0	2,75	21,2	5,17	4,8	0,19
13	СТ-239-332	26,2	2,12	13,6	3,32	0	0
14	СТ-239-472	20,3	1,64	15,4	3,75	0	0
15	СТ-239-478	2,0	0,16	16,5	4,02	0	0
16	СТ-239-610	130,1	10,54	37,9	9,24	991,5	3,93
17	СТ-239-610	141,4	11,45	45,7	11,14	999,6	3,96
18	СТ-239-643	7,1	0,57	20,8	5,07	0	0
19	СТ-239-657,5	14,8	1,19	7,5	1,83	0	0
20	СТ-243-248,8-249,8	35,8	2,90	1,5	3,66	857,8	3,40
21	СТ-243-279-283	23,2	1,88	17,6	4,29	408,8	1,62
22	СТ-243-279-283а	27,8	2,25	14,3	3,49	459,7	1,82
23	СТ-243-282,3	67,7	5,48	19,3	4,71	775,7	3,08
24	СТ-243-283,5-284,5	23,2	1,88	17,6	4,29	408,8	1,62
25	СТ-243-345-351	0	0	0	0	7,3	0,29
26	СТ-243-412-418	13,2	1,07	12,5	3,05	7,9	0,31
27	СТ-250-520	6,2	0,50	11,0	2,71	0,0	0,00
28	СТ-251-458	39,5	3,20	25,6	6,24	450,2	1,78
29	СТ-251-494	15,1	1,22	13,8	3,36	0	0
30	СТ-251-542	0	0	0	0	0	0
31	СТ-302-261,5-270,5	20,1	1,63	9,1	2,22	257,9	1,02
32	СТ-302-295-308	22,7	1,84	10,9	2,66	208,7	0,83
33	СТ-303-586	15,8	1,28	17,3	4,22	0	0
34	СТ-306-413,3	28,2	2,28	18,1	4,41	0	0
35	СТ-306-459,5-469	2,3	0,19	6,7	1,63	3,2	0,13
36	СТ-306-490	20,4	1,65	11,8	2,88	53,6	0,21
37	СТ-306-505-505,5	0	0	0	0	148,3	0,59
38	СТ-307-366	20,2	1,64	9,2	2,24	0	0
39	СТ-307-446	18,3	1,48	7,6	1,85	0	0
40	СТ-307-454	8,8	0,71	6,1	1,49	0	0
41	СТ-307-477	169,1	13,70	47,3	11,53	1158,0	4,59
42	СТ-307-488	34,1	2,76	14,9	3,63	36,5	0,14
43	СТ-307-490	26,2	2,12	11,7	2,85	23,8	0,09
44	СТ-516-549 (Рубежовичи)	15,8	1,3 (1,0)	19,4	4,7 (6,0)	209,2	0,80

Таблица 1

по изученным образцам горных пород

Table 1

concerning the analysed rock samples

К <sub>общ</sub> , %	Теплогенерация, мкВт/м <sup>3</sup>	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Порода
0,44	0,95	–	Плагиогнейс амфибол-биотитовый
0	0,69	2800	Сланец амфиболовый с пиритом
0,67	0,85	–	Плагиогнейс амфибол-биотитовый
0,95	0,94	2800	Амфиболит биотитсодержащий
0,74	1,09	–	Плагиогнейс биотит-амфиболовый
1,19	1,82	–	Плагиогнейс биотитовый
0	0,74	–	Плагиогнейс амфиболовый
3,50	1,88	2670	Гранит крупнозернистый
0	0,59	2850	Метадиабаз
2,99	1,72	2670	Гранит крупнозернистый
0	0,23	–	Амфиболит
0,16	1,27	3100	Амфиболит гранатовый
0	0,82	–	Амфиболит гранатовый
0	0,72	2800	Амфиболит
0	0,34	–	Плагиогнейс амфиболовый
3,30	3,70	2670	Гранит
3,33	4,27	–	Гранит
0	0,53	–	Амфиболит магнетитовый
0	0,54	3300	Гранат-пироксеновая порода с магнетитом
2,86	1,34	–	Плагиогранит пегматоидный с турмалином
1,36	0,96	–	Плагиогнейс биотитовый
1,53	0,97	–	Гранит турмалиносодержащий
2,59	2,13	2850	Гранит
1,36	0,96	–	Гранит грейзенизированный с турмалином
0,24	0	2750	Плагиогнейс куммингтонитовый с турмалином
0,26	0,54	2800	Плагиогнейс амфиболовый
0	0,34	–	Амфиболит
1,49	1,48	–	Амфиболит
0	0,58	–	Кварцит амфибол-магнетитовый
0	0	2700	Плагиогнейс
0,86	0,69	2800	Плагиогнейс амфиболовый
0,69	0,77	–	Сланец амфиболовый
0	0,66	–	Плагиогнейс амфиболовый
0	0,95	–	Плагиогнейс гранат-амфиболовый
0,11	0,19	3000	Сланец амфиболовый с гранатом и магнетитом
0,18	0,71	2950	Гнейс гранатовый
0,49	0,05	2900	Сланец амфиболовый гранатсодержащий
0	0,61	–	Амфиболит
0	0,54	–	Амфиболит
0	0,30	–	Амфиболит
3,86	4,97	–	Гранит
0,12	1,03	–	Плагиогнейс амфиболовый
0,07	0,79	–	Плагиогнейс амфиболовый
0,7 (0,8)	0,77	2794	Микрогнейс эпидот-амфиболовый



Радиоактивные элементы присутствуют в составе всех горных пород. Излучаемая энергия радиоактивного распада превращается в тепло посредством абсорбции. На фоне того, что концентрация в отдельных образцах совпадающих и похожих типов пород может быть разной, обнаруживается общее правило.

Выделяются шесть типов горных пород кристаллического фундамента Беларуси, различающихся средними значениями содержания радиоактивных элементов (табл. 2).

По полученным ранее результатам [6] и с учетом преобладающих типов метаморфических и интрузивных пород в отдельных структурных зонах фундамента выявлены различия в содержании радиоактивных изотопов и величине теплогенерации (табл. 3).

Таблица 2

**Содержание радиоактивных элементов и уровень радиогенной теплогенерации  
главных типов пород кристаллического фундамента Беларуси**

Table 2

**Content of radioactive elements and the level of radiogenic heat generation of the main types  
of rocks of the crystalline basement of Belarus**

Типы горных пород	Параметры			
	<sup>238</sup> U, г/т	<sup>232</sup> Th, г/т	K <sub>общ</sub> , %	Уровень радиогенной теплогенерации, мкВт/м <sup>3</sup>
Ультрабазиты и ультрамафиты аргеловщинского комплекса, некоторые разновидности амфиболовых сланцев и карбонатные породы околоской серии	0,06–2,10	0,9–4,7	Менее 0,1	0,20–0,75
Метаморфические породы основного и среднего состава щучинской и околоской серий и амфиболит-гнейсового комплекса (кристаллические сланцы, амфиболиты, амфиболовые и гранат-амфиболовые сланцы, амфиболовые гнейсы), эндробиты, габброиды	0,38–2,81	1,5–4,2	0,1–0,9	0,03–1,10
Магматические породы основного и среднего состава (метадиабазы, диориты), метаморфические породы (амфибол-биотитовые и биотитовые гнейсы, серицит-хлоритовые сланцы)	1,20–5,40	2,8–9,9	1,1–2,1	0,75–2,30
Магматические породы среднего и кислого состава (кварцевые диориты, гранодиориты, граниты), гранито-гнейсы, трахиандезиты, а также метаморфические породы (гранат-биотитовые гнейсы щучинской и кулажинской серий)	1,60–4,50	2,7–11,7	2,0–2,8	0,80–2,0
Магматические породы кислого состава (чарнокиты, граниты, гранито-гнейсы)	2,40–8,80	4,2–19,7	3,2–4,4	1,40–4,50
Магматические породы кислого состава с повышенной калиевой щелочностью (субщелочные и рапакивиоподобные граниты, сиениты)	10,70–16,60	30,6–82,6	4,4–6,2	5,50–9,10

Примечания: 1. Разработано на основе данных публикации [11]. 2. Здесь и в табл. 2 суммарное процентное содержание стабильного изотопа <sup>39</sup>K и радиоактивного изотопа <sup>40</sup>K в изученном образце обозначается как K<sub>общ</sub>.

Таблица 3

**Содержание радиоактивных элементов и уровень радиогенной теплогенерации  
в породах главных структурных зон и интрузивных массивов кристаллического фундамента Беларуси**

Table 3

**Content of radioactive elements and the level of radiogenic heat generation  
in rocks of the main structural zones and intrusive basement massifs of Belarus**

Структурные зоны и интрузивные массивы	Параметры							Уровень радиогенной теплогенерации, мкВт/м <sup>3</sup>
	<sup>238</sup> U, Бк/кг	<sup>238</sup> U, г/т	<sup>232</sup> Th, Бк/кг	<sup>232</sup> Th, г/т	<sup>40</sup> K, Бк/кг	<sup>40</sup> K, г/т	K <sub>общ</sub> , %	
<i>Западная часть Беларуси</i>								
Гранулитовые блоки	25,06	2,03	22,09	5,39	472,5	1,87	1,58	1,10
Зоны бластомилонитов Белорусско-Прибалтийского гранулитового пояса	63,60	5,15	64,11	17,09	1082,0	4,01	3,61	2,95

Окончание табл. 3  
Ending of the table 3

Структурные зоны и интрузивные массивы	Параметры							Уровень радиогенной теплогенерации, мкВт/м <sup>3</sup>
	<sup>238</sup> U, Бк/кг	<sup>238</sup> U, г/т	<sup>232</sup> Th, Бк/кг	<sup>232</sup> Th, г/т	<sup>40</sup> K, Бк/кг	<sup>40</sup> K, г/т	K <sub>общ</sub> , %	
Мостовский и другие массивы субщелочных гранитов	152,64	11,53	226,17	55,15	1584,9	3,82	5,25	7,27
<i>Центральная часть Беларуси</i>								
Районы распространения амфиболит-гнейсового комплекса	34,26	2,78	23,94	5,82	322,1	1,76	1,08	1,28
Околовская грабен-синклиналь, сложенная породами сланцево-гнейсового комплекса (околовская серия)	24,93	2,01	14,29	3,54	182,6	0,76	0,63	0,86
Ультрамафитовые массивы	18,11	1,47	9,90	2,41	43,1	0,17	0,14	0,65
Бобовнянский массив рапакивиподобных гранитов	116,53	9,45	97,24	23,71	1357,3	4,93	4,52	4,64
<i>Юго-восточная часть Беларуси</i>								
Брагинский гранулитовый массив	37,82	3,06	42,81	10,43	720,3	2,69	2,40	1,82
Районы распространения амфиболит-гнейсового комплекса	24,92	2,02	19,98	4,86	406,7	0,66	1,35	0,99
Осницко-Микашевичский вулканоплутонический пояс	31,37	2,53	30,25	7,37	713,3	1,21	2,42	1,38
Северный эндоконтакт Коростенского рапакивигранитного массива	92,38	7,47	98,48	24,0	1336,5	4,65	4,46	4,08
Бобовнянская впадина	66,82	5,41	55,64	13,57	1034,0	4,10	3,44	2,67
Овручская впадина	70,10	5,68	54,42	13,27	621,3	2,46	2,07	2,73

Примечание. Разработано на основе данных публикации [11].

На рис. 5–7 по результатам изучения более 420 образцов горных пород фундамента Беларуси показана связь между значениями концентрации изотопов <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th и <sup>40</sup>K и уровнем общей теплогенерации. В первом приближении все три набора точек на графиках можно упрощенно аппроксимировать прямыми линиями. Наибольший вклад в теплогенерацию обеспечивают изотопы <sup>238</sup>U и <sup>232</sup>Th, значительно меньший вклад вносит изотоп <sup>40</sup>K.

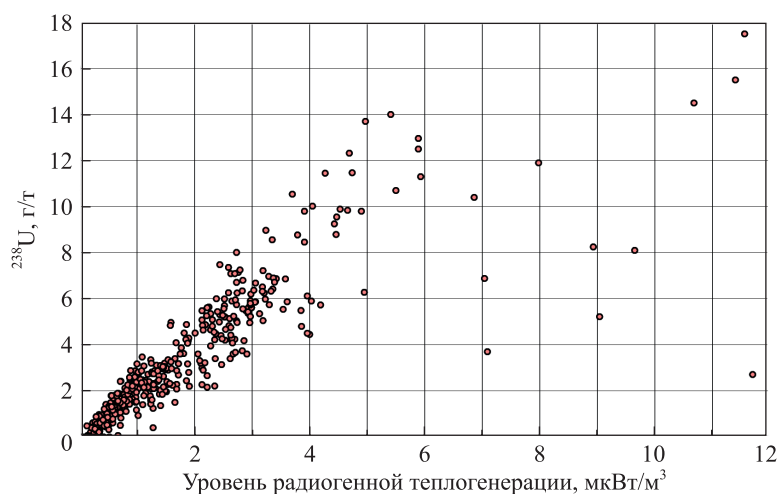


Рис. 5. Связь значений концентрации изотопа <sup>238</sup>U с уровнем радиогенной теплогенерации

Fig. 5. Relationship between <sup>238</sup>U isotope concentration and the level of radiogenic heat generation

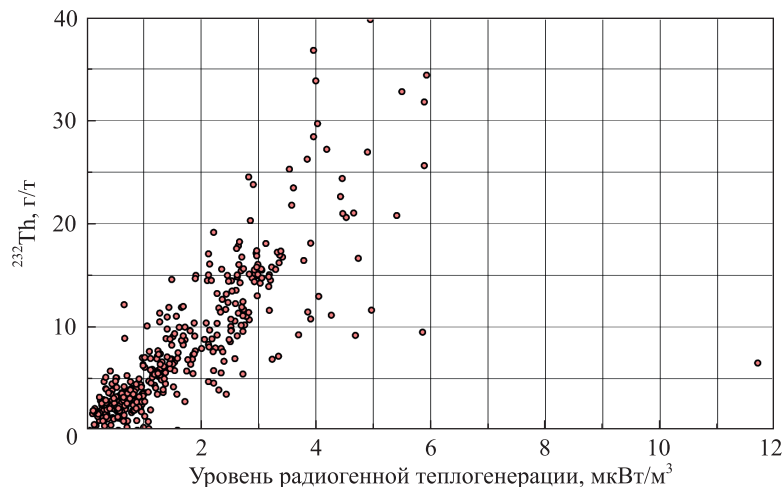


Рис. 6. Связь значений концентрации изотопа  $^{232}\text{Th}$  с уровнем радиогенной теплогенерации

Fig. 6. Relationship between  $^{232}\text{Th}$  isotope concentration and the level of radiogenic heat generation

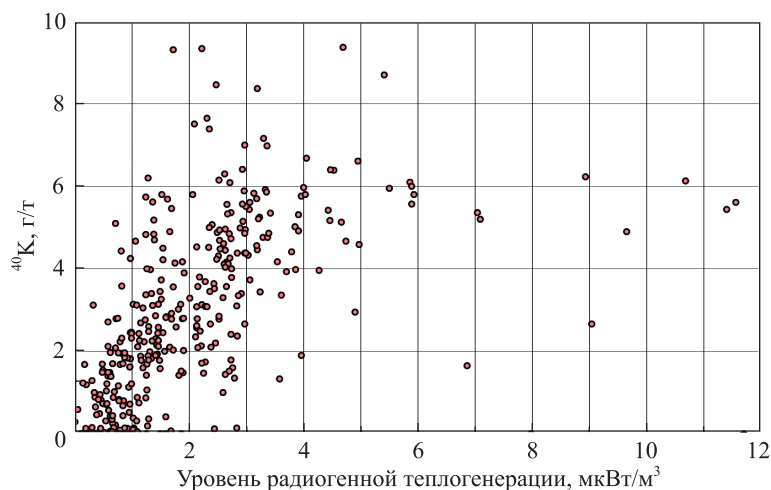


Рис. 7. Связь значений концентрации изотопа  $^{40}\text{K}$  с уровнем радиогенной теплогенерации

Fig. 7. Relationship between  $^{40}\text{K}$  isotope concentration and the level of radiogenic heat generation

На фоне повышения общего уровня теплогенерации по мере увеличения значений содержания изотопа наблюдается ряд точек в нижней правой части графика за пределами области их кучного распределения. Это можно связать как с возможными погрешностями определения показателей концентрации изотопа  $^{238}\text{U}$ , так и с его подвижностью (миграцией) в породах.

Количество растворимого компонента радиоактивных элементов увеличивается с ростом значений их общего содержания, и он становится подвижным, по мере того как вода мигрирует через породу. Высокая подвижность этих элементов литосферы является причиной увеличения показателей их концентрации в верхних слоях земной коры как еще не завершившегося процесса, наблюдаемого на протяжении всей истории Земли. Пространственное и хронологическое распределение источников радиоактивного тепла оказывает большое влияние на температурное поле недр Земли, так как 30–50 % плотности теплового потока, зафиксированного у поверхности, вызваны распадом нестабильных изотопов [12]. Считается также, что в пределах однородных слоев литосферы распределение теплогенерирующих радиоактивных элементов не остается постоянным и не соответствует показателям их концентрации, наблюдаемым в верхней части земной коры. Уровень радиогенной теплогенерации на глубинах, недоступных бурению, косвенно оценивается исходя из значений скорости распространения продольных сейсмических волн [13].

На рис. 6 и 7 отражено соотношение значений концентрации изотопов  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  в изученных образцах с уровнем суммарной радиогенной теплогенерации, выделяемой от совместного влияния изотопов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ . На фоне монотонного увеличения их концентрации и связанного с этим роста объемов тепловыделения также наблюдается разброс точек, прежде всего в верхних частях графиков.

### Результаты и их обсуждение

Тепловой поток является одним из главных исходных параметров при разработке геодинамических моделей земной коры в частности и астеносферы в целом [3]. Значения радиогенной теплогенерации существенно влияют на прогнозное распределение теплового потока в разрезе земной коры различных регионов и на выделение его провинций [14].

Проблема изучения концентрации радиоактивных долгоживущих изотопов в горных породах кристаллического фундамента Беларуси возникла в связи с анализом плотности теплового потока в регионе и оценкой его составляющей, генерируемой в верхней части земной коры вследствие их распада. Основной вклад в радиогенную теплогенерацию вносят изотопы  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ . Более 99 % радиогенного тепла, генерируемого в недрах планеты, также обусловлено этими элементами [15]. В радиогенной генерации тепла участвуют и другие изотопы, например  $^{124}\text{Sn}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ . Однако из-за малой доли концентрации и невысокого уровня теплогенерации (для природного изотопа  $^{87}\text{Rb}$  значение этого показателя составляет всего  $10^{-12}$  Вт/г) их вклад несуществен (около 1 %) [12], и на практике данные изотопы не учитываются. В целом минералы урана и тория имеют значение на больших площадях, где они обнаружены в качестве микроэлементов. Только в своем глобальном распространении они вносят вклад в общее тепло Земли [12].

В областях стационарного теплового режима (отдельные структуры древних стабилизированных платформ, щиты и складчатые области фанерозоя) вклад радиогенной теплогенерации в тепловой поток равняется 40–70 % [15; 16]. Для сильно эродированного гранитогнейсового слоя земной коры доля составляющей теплового потока характеризуется весьма низкими значениями.

Доля содержания урана, тория и калия увеличивается при более высоких значениях концентрации кремнезема в породе. Эти три элемента можно найти в горных породах. Механизмы связывания приводят к образованию двух основных компонентов – легкорастворимого и менее растворимого. Менее растворимая часть закрепляется в кристаллической решетке одного или нескольких отдельных минералов, входящих или встроенных в структуру минерала. Легкорастворимая часть абсорбируется на границах зерен либо на поверхности кристаллов или находится в порах породы (рис. 8) [12].

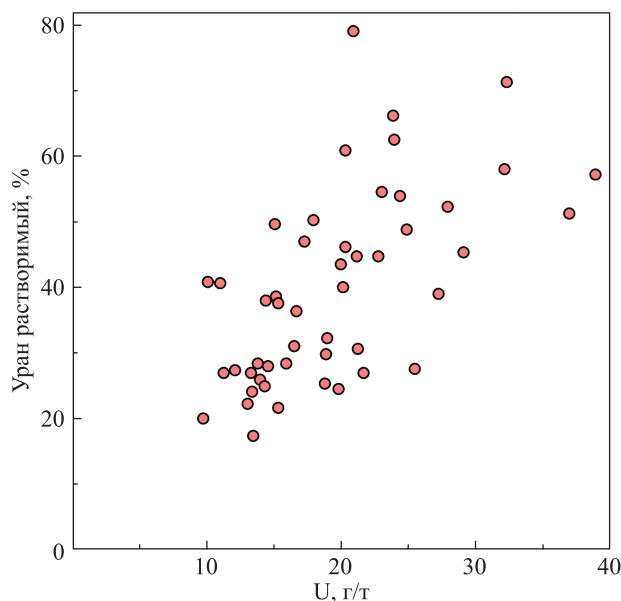


Рис. 8. Концентрация легкорастворимой части урана, содержащегося в сиените (Валь-Гиув, Аарский массив, Швейцария).  
Источник: [17], с изменениями

Fig. 8. Concentration of the easily soluble part of the uranium contented in syenite (Val Giuv, Aarmassif, Switzerland).  
Source: [17], modified

Растворимая составляющая радиоактивных элементов увеличивается пропорционально их общей концентрации и становится подвижной, как только вода мигрирует через породу. Эта миграция приводит к перераспределению урана и тория. Такое перераспределение происходит не только при выветривании, но и при остывании интрузий в верхней части земной коры [18; 19]. Второй процесс может даже привести к перераспределению относительно растворимых компонентов. В связи с этим образцы, полученные из коры выветривания кристаллических пород, не отбирались.

### Заключение

Результаты проведенного исследования радиогенной теплогенерации образцов кристаллического фундамента показывают, что значения теплогенерации ультраосновных и основных пород (ультрамафиты, амфиболиты, амфиболовые сланцы, габброиды, метадиабазы) являются более низкими, чем значения теплогенерации кислых пород (гранитогайсы, граниты, риолиты, сиениты). Однотипные породы, входящие в состав разных вещественных комплексов и распространенные в различных структурных зонах кристаллического фундамента, имеют близкие значения содержания элементов.

Минимальные значения параметров связаны с ультрамафическими породами и метаморфическими образованиями Околовской грабен-синклинали, более высокие – с областями преимущественного распространения пород амфиболит-гнейсового комплекса в центральной и юго-восточной частях Беларуси, а также породы гранулитовых блоков в Белорусско-Прибалтийском поясе. Зоны бластомилонитов, разделяющие эти блоки, имеют повышенную теплогенерацию, обусловленную развитием в их пределах разнообразных гранитоидов.

Максимальное содержание изотопов и самые большие величины теплогенерации свойственны наиболее молодым субщелочным и рапакивиподобным гранитам мостовского, бобовнянского и коростенского комплексов рапакивигранитной формации. Они обогащены торием, который концентрируется в монаците, ортите, торите, цирконе и других акцессорных минералах, а также ураном и редкоземельными элементами. Породы рапакивигранитной формации на западе Восточно-Европейского кратона слагают обширные массивы. В районах их распространения также зафиксирован повышенный тепловой поток.

Более высокое значение теплогенерации наблюдается в северной зоне Припятского прогиба. В скважине «Барсуки-60» оно составляет  $2,15 \text{ мкВт/м}^3$ , в скважине «Судовица» –  $7,0\text{--}5,5 \text{ мкВт/м}^3$ . В других скважинах показатель теплогенерации изменяется от  $0,56$  до  $5,50 \text{ мкВт/м}^3$ . Уровень радиогенной теплогенерации в скважинах, пробуренных на Бобовнянском выступе Белорусской антеклизы, является низким ( $0,52\text{--}1,24 \text{ мкВт/м}^3$ ), однако для одиночных образцов он возрастает до  $3,35 \text{ мкВт/м}^3$ . На остальной территории антеклизы значение теплогенерации колеблется от  $1$  до  $2 \text{ мкВт/м}^3$ . В Оршанской впадине наибольшая величина тепловыделения ( $2,62 \text{ мкВт/м}^3$ ) определена для одного образца частично выветрелого гнейса, поднятого из скважины «ТЛ-29», где забой вскрыл только зону выветривания (глубина  $776\text{--}782 \text{ м}$ ). В скважине «Василевичи-15» Оршанской впадины значение теплогенерации достигает  $2,15 \text{ мкВт/м}^3$ . В других образцах горных пород оно характеризуется как низкое ( $1\text{--}2 \text{ мкВт/м}^3$ ), что согласуется с невысоким наблюдаемым тепловым потоком. Из скважины «Смоленск-1», расположенной в российской части Оршанской впадины, изучен только 1 образец габбро, уровень его теплогенерации еще ниже ( $0,56 \text{ мкВт/м}^3$ ).

### Библиографические ссылки

1. Гарецкий РГ, Матвеев АВ, Махнач АС, редакторы. *Геология Беларуси*. Минск: Институт геологических наук НАН Беларуси; 2001. 815 с.
2. Махнач АС, Гарецкий РГ, Матвеев АВ. *Основы геологии Беларуси*. Махнач АС, редактор. Минск: Институт геологических наук НАН Беларуси; 2004. 392 с.
3. Хуторской МД. *Введение в геотермию*. Москва: Издательство Российского университета дружбы народов; 1996. 156 с.
4. Rybach L. Determination of heat production rate. In: Haenel R, Rybach L, Stegena L, editors. *Handbook of terrestrial heat-flow density determination: guidelines and recommendations of the International Heat Flow Commission*. Dordrecht: Springer; 1988. p. 125–142.
5. Хуторской МД, Поляк БГ. Роль радиогенной теплогенерации в формировании поверхностного теплового потока. *Геотектоника*. 2016;2:43–61. DOI: 10.7868/S0016853X16020041.
6. Лосева ЕИ, Зуй ВИ, Аксаментова НВ. Радиогенная теплогенерация горных пород главных структурных зон и интрузивных массивов кристаллического фундамента Беларуси. В: Аношко ЯИ, редактор. *Проблемы водных ресурсов, геотермии и геоэкологии. Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Г. В. Богомолова; 1–3 июня 2005 г.; Минск, Беларусь. Том 1*. Минск: Институт геохимии и геофизики НАН Беларуси; 2005. с. 270–272.

7. Розанов АД, Антонов ОФ, Дридж НЛ, Лимин БВ. Опыт работы с гамма-радиометром РУГ-91 «Адани». *Гигиена и санитария*. 1994;2:40–41.
8. Audi G, Bersillon O, Blachot J, Wapstra AH. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties. *Nuclear Physics A*. 2003;729(1):3–128. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.001.
9. Горбушина ЛВ, Зимин ДФ, Сердюкова АС. *Радиометрические и ядерно-геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых*. Москва: Атомиздат; 1970. 376 с.
10. Моисеенко УИ, Смыслов АА. *Температура земных недр*. Ленинград: Недра; 1986. 178 с.
11. Зуй ВИ, Аксаметова НВ, Лосева ЕИ. Уран, торий, калий и радиогенная теплогенерация в породах кристаллического фундамента Беларуси. В: Лукашев ОВ, редактор. *Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых. Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Константина Игнатьевича Лукашева (1907–1987); 14–16 марта 2007 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Издательский центр БГУ; 2007. с. 20–23.
12. Buntebarth G. *Geothermics: an introduction*. Chapman IM, Chapman DS, translators. Berlin: Springer Berlin Heidelberg; 1984. 144 p.
13. Rybach L. The relationship between seismic velocity and radioactive heat production in crustal rocks: an exponential law. *Pageoph*. 1978;117:75–82.
14. Drury M. Heat flow provinces reconsidered. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1987;49(1–2):78–96. DOI: 10.1016/0031-9201(87)90133-6.
15. Смыслов АА, Моисеенко УИ, Чадович ТЗ. *Тепловой режим и радиоактивность Земли*. Ленинград: Недра; 1979. 191 с.
16. Кутас РИ, Гордиенко ВВ. *Тепловое поле Украины*. Киев: Наукова думка; 1971. 140 с.
17. Labhart TP, Rybach L. Granite und Uranvererzungen in den Schweizer Alpen. *Geologische Rundschau*. 1974;63:135–147.
18. Buntebarth G. Method der zur Abschätzung der Wärmeflußdichte aus dem oberen Mantel. *Geologische Rundschau*. 1976;65: 809–819.
19. Rybach L, Buntebarth G. Heat generating radioelements in granitic magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1981;10(4):395–404. DOI: 10.1016/0377-0273(81)90088-3.

## References

1. Garetskii RG, Matveev AV, Makhnach AS, editors. *Geologiya Belarusi* [Geology of Belarus]. Minsk: Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus; 2001. 815 p. Russian.
2. Makhnach AS, Garetskii RG, Matveev AV. *Osnovy geologii Belarusi* [Fundamentals of the geology of Belarus]. Makhnach AS, editor. Minsk: Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus; 2004. 392 p. Russian.
3. Khutorskoi MD. *Vvedenie v geotermiyu* [Introduction to geothermics]. Moscow: Izdatel'stvo Rossiiskogo universiteta druzhby narodov; 1996. 156 p. Russian.
4. Rybach L. Determination of heat production rate. In: Haenel R, Rybach L, Stegena L, editors. *Handbook of terrestrial heat-flow density determination: guidelines and recommendations of the International Heat Flow Commission*. Dordrecht: Springer; 1988. p. 125–142.
5. Khutorskoi MD, Polyak BG. Role of radiogenic heat generation in surface heat flow formation. *Geotectonics*. 2016;2:43–61. Russian. DOI: 10.7868/S0016853X16020041.
6. Loseva EI, Zui VI, Aksamentova NV. [Radiogenic heat generation of rocks of the main structural zones and intrusive massifs of the crystalline basement of Belarus]. In: Anoshko YaI, editor. *Problemy vodnykh resursov, geotermii i geoekologii. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika G. V. Bogomolova; 1–3 iyunya 2005 g.; Minsk, Belarus'*. Tom 1 [Problems of water resources, geothermal and geocology. Proceedings of the International scientific conference dedicated to the 100<sup>th</sup> anniversary of the birth of academician G. V. Bogomolov; 2005 June 1–3; Minsk, Belarus. Volume 1]. Minsk: Institute of Geochemistry and Geophysics of the National Academy of Sciences of Belarus; 2005. p. 270–272. Russian.
7. Rozanov AD, Antonov OF, Dridzh NL, Limin BV. [Experience with gamma-radiometer RUG-91 «Adani»]. *Gigiya i sanitariya*. 1994;2:40–41. Russian.
8. Audi G, Bersillon O, Blachot J, Wapstra AH. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties. *Nuclear Physics A*. 2003;729(1):3–128. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.001.
9. Gorbushina LV, Zimin DF, Serdyukova AS. *Radiometricheskie i yaderno-geofizicheskie metody poiskov i razvedki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Radiometric and nuclear-geophysical methods of prospecting and exploration of mineral deposits]. Moscow: Atomizdat; 1970. 376 p. Russian.
10. Moiseenko UI, Smyslov AA. *Temperatura zemnykh neдр* [The temperature of the earth's interior]. Leningrad: Nedra; 1986. 178 p. Russian.
11. Zui VI, Aksamentova NV, Loseva EI. [Uranium, thorium, potassium and radiogenic heat generation in rocks of the crystalline basement of Belarus]. In: Lukashev OV, editor. *Sovremennyye problemy geokhimii, geologii i poiskov mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika Konstantina Ignatyevicha Lukasheva (1907–1987); 14–16 marta 2007 g.; Minsk, Belarus'* [Modern problems of geochemistry, geology and the search for mineral deposits. Proceedings of the International scientific conference dedicated to the 100<sup>th</sup> anniversary of the birth of academician Konstantin Ignatievich Lukashev (1907–1987); 2007 March 14–16; Minsk, Belarus]. Minsk: Izdatel'skii tsentr BGU; 2007. p. 20–23. Russian.
12. Buntebarth G. *Geothermics: an introduction*. Chapman IM, Chapman DS, translators. Berlin: Springer Berlin Heidelberg; 1984. 144 p.
13. Rybach L. The relationship between seismic velocity and radioactive heat production in crustal rocks: an exponential law. *Pageoph*. 1978;117:75–82.

14. Drury M. Heat flow provinces reconsidered. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1987;49(1–2):78–96. DOI: 10.1016/0031-9201(87)90133-6.
15. Smyslov AA, Moiseenko UI, Chadovich TZ. *Teplovoi rezhim i radioaktivnost' Zemli* [Thermal regime and radioactivity of the Earth]. Leningrad: Nedra; 1979. 191 p. Russian.
16. Kutas RI, Gordienko VV. *Teplovoe pole Ukrainy* [Thermal field of Ukraine]. Kyiv: Naukova dumka; 1971. 140 p. Russian.
17. Labhart TP, Rybach L. Granite und Uranvererzungen in den Schweizer Alpen. *Geologische Rundschau*. 1974;63:135–147.
18. Buntebarth G. Method der Abschätzung der Wärmeflußdichte aus dem oberen Mantel. *Geologische Rundschau*. 1976;65:809–819.
19. Rybach L, Buntebarth G. Heat generating radioelements in granitic magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1981;10(4):395–404. DOI: 10.1016/0377-0273(81)90088-3.

Получена 19.05.2023 / принята 28.08.2023.  
Received 19.05.2023 / accepted 28.08.2023.