

## ТЕПЛОВОЙ ПОТОК И РАДИОГЕННАЯ ТЕПЛОГЕНЕРАЦИЯ ОТДЕЛЬНЫХ СТРУКТУР КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА БАЛТИЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Распределение теплового потока в пределах Балтийской синеклизы и его связь с глубинным строением земной коры уже неоднократно обсуждались в печати (Зуй и др., 1985; Цыбуля, Урбан, 1988). Наибольшее количество определений потока приходится на среднюю часть Прибалтики (Латвийская ССР и юг Эстонской ССР), охватывающую в основном следующие структурные элементы кристаллического фундамента: Рижский плутон, Инчукалнскую складчатую зону, Восточно-Латвийский гранито-гнейсовый блок, частично Латвийско-Эстонский и Западно-Литовский архейские складчатые массивы. Границы указанных геологических структур приведены (рис. 1, 2) согласно имеющейся схеме тектоники кристаллического фундамента Прибалтики (Пуура и др., 1984).

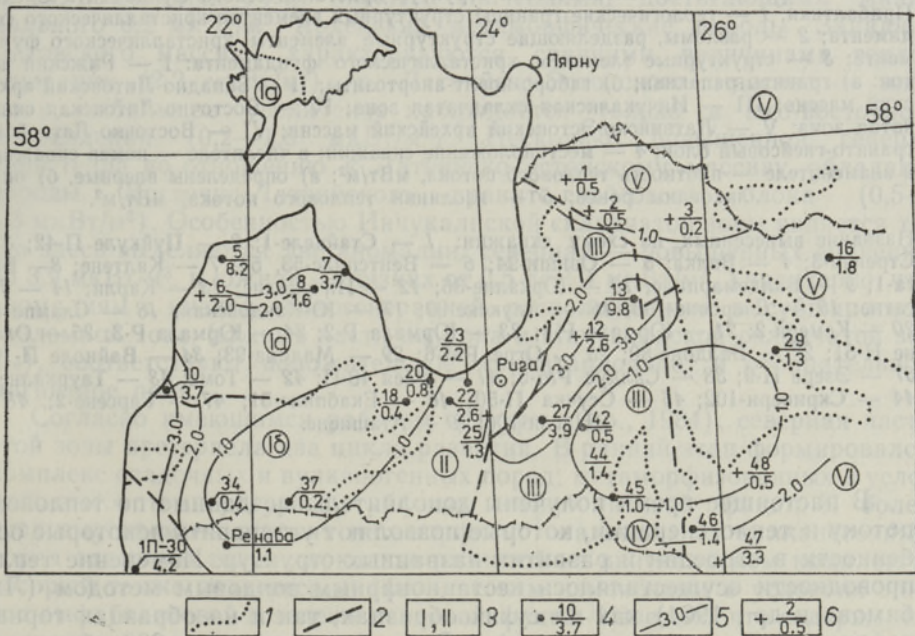


Рис. 1. Радиогенная теплогенерация тектонических структур кристаллического фундамента Средней Прибалтики. 1 — геологические границы структурных элементов кристаллического фундамента; 2 — разломы, разделяющие структурные элементы кристаллического фундамента; 3 — структурные элементы кристаллического фундамента: I — Рижский плутон; а) граниты рапакиви; б) габбро-норит-анортозиты; II — Западно-Литовский архейский массив; III — Инчукалнская складчатая зона; IV — Восточно-Литовская складчатая зона; V — Латвийско-Эстонский архейский массив; VI — Восточно-Латвийский гранито-гнейсовый блок; 4 — местоположение скважин; в числителе — номер скважины, в знаменателе — величина теплогенерации, мкВт/м<sup>3</sup>; 5 — изолинии теплогенерации, мкВт/м<sup>3</sup>; 6 — скважины, в которых концентрация радиоактивных элементов определялась лабораторными методами.



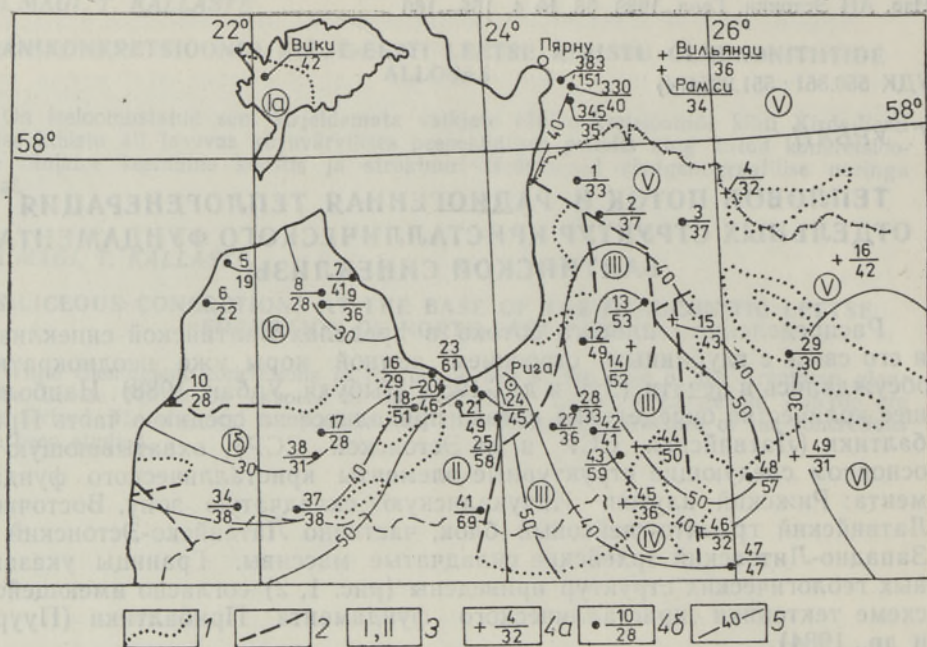


Рис. 2. Тепловой поток тектонических структур кристаллического фундамента Средней Прибалтики. 1 — геологические границы структурных элементов кристаллического фундамента; 2 — разломы, разделяющие структурные элементы кристаллического фундамента; 3 — структурные элементы кристаллического фундамента: I — Рижский плутон: а) граниты рапакиви; б) габбро-норит-анортозиты; II — Западно-Литовский архейский массив; III — Инчукалнская складчатая зона; IV — Восточно-Литовская складчатая зона; V — Латвийско-Эстонский архейский массив; VI — Восточно-Латвийский гранито-гнейсовый блок; 4 — местоположение скважин: в числителе — номер скважины, в знаменателе — плотность теплового потока, мВт/м<sup>2</sup>: а) определены впервые, б) опубликованы ранее; 5 — изолинии теплового потока, мВт/м<sup>2</sup>.

Название вынесенных на схему скважин: 1 — Стайцелле-1; 2 — Пуйкуле П-42; 3 — Стренчи-3; 4 — Валка; 5 — Овиши-94; 6 — Вентспилс-53, 54; 7 — Калтене; 8 — Банга-1; 9 — Валдемарпилс; 10 — Юркале-36; 12 — Инчукалнс; 13 — Карли; 14 — Лигатне; 15 — Дзербене-100; 16 — Алуксне-99; 17 — Ю-Кандовская; 18 — Слампе 83; 20 — Кемери-2; 21 — Юрмала Р-4; 23 — Юрмала Р-2; 24 — Юрмала Р-3; 25 — Олайне Н-51; 27 — Балдоне-80; 28 — Огре РМ-6; 29 — Мадона-93; 34 — Вайноде П-101; 37 — Эзере П-9; 38 — Салдус РМ-5; 41 — Элея 48-П; 42 — Томе; 43 — Тауркалне-1; 44 — Скривери-102; 45 — Стучка П-50; 46 — Екабпилс-51; 47 — Гарсене-2; 48 — Нагли-106; 49 — Аташиене.

В настоящее время получены дополнительные данные по тепловому потоку и теплогенерации, которые позволяют установить некоторые особенности в строении и развитии названных структур. Измерение теплопроводности осуществлялось нестационарным зондовым методом (Любимова и др., 1964) как на сухих образцах, так и на образцах горных пород с естественной влажностью. Всего было измерено 230 образцов.

Для более достоверной интерпретации данных теплового потока в ряде скважин была оценена теплогенерация в горных породах, слагающих верхнюю часть кристаллического фундамента (рис. 1). При этом использовались данные гамма-каротажа, а также определения концентраций радиоактивных элементов в горных породах. Всего было исследовано 18 образцов из различных скважин. В результате обработки диаграмм гамма-каротажа, выполненной по общепринятой методике (Новиков, Капков, 1965), получено суммарное содержание урана и тория в породах. Для вычисления раздельной концентрации урана и тория были рассчитаны регрессионные зависимости между суммарным



содержанием и содержанием каждого элемента, определенным в лабораторных условиях:

$$U = (0,28I - 0,36) \times 10^{-4},$$

$$Th = (0,98I - 2,62) \times 10^{-4},$$

где  $I$  — суммарная концентрация урана и тория в процентах. Коэффициент корреляции для каждой зависимости — соответственно 0,94 и 0,89. Количество тепла, выделяемого из единицы объема породы вычисляли по формуле

$$\Delta Q = \sum \rho_i h_i (a U + b Th + c K),$$

где  $\rho_i$  и  $h_i$  — плотность и мощность отдельных слоев;  $a, b, c$  — удельные тепловыделения при распаде  $U, Th, K$ ;  $a = 9,69 \times 10^{-8}$ ;  $b = 2,64 \times 10^{-8}$ ;  $c = 35,78 \times 10^{-13}$  Вт/г (Кутас, 1978).

Выполненные радиологические исследования и вычисления показывают, что в целом для рассматриваемых структур характерны низкие значения теплогенерации. В пределах Рижского плутона, где на поверхность кристаллического фундамента выходят граниты рапакиви (северная часть Курземского п-ова), отмечаются повышенные значения, изменяющиеся от 1,6 до 3,7 мкВт/м<sup>3</sup>. Максимальная величина 8,2 мкВт/м<sup>3</sup>, видимо, обусловлена тем, что измерение гамма-активности проводилось только в выветрелых породах фундамента. Южная часть плутона, которая представлена породами габбро-норит-анортозитового комплекса, выделяется очень низкими значениями, достигающими минимального 0,2 мкВт/м<sup>3</sup>. Архейские метаморфические породы Западно-Литовского массива характеризуются средними величинами теплогенерации (2,2 мкВт/м<sup>3</sup>), а Латвийско-Эстонского массива — низкими, небольшое увеличение наблюдается только в юго-восточном направлении (0,2—1,8 мкВт/м<sup>3</sup>). Несколько повышенной генерацией тепла по отношению к Латвийско-Эстонскому массиву обладают породы Восточно-Латвийского гранито-гнейсового блока (0,5—3,3 мкВт/м<sup>3</sup>). Особенностью Инчукалнской складчатой зоны является то, что здесь выделяются две аномалии: северная — повышенных значений до 3,9 мкВт/м<sup>3</sup>, и южная — низких от 0,5 до 1,4 мкВт/м<sup>3</sup>. Характерно, что аномалиям с низкой теплогенерацией, расположенным в субширотной разломной зоне (южные части плутона и Инчукалнской складчатой зоны), соответствуют положительное гравитационное и отрицательное магнитное поля.

Согласно имеющимся работам (Пуура и др., 1984), северная часть этой зоны претерпела два цикла развития. В ранний этап формировался комплекс осадочных и вулканогенных пород, метаморфизованных в условиях высокотемпературной субфации амфиболитовой фации. К более позднему времени относят метаморфизм осадочных и вулканогенных пород адажской толщи, локально развитой на инчукалнском комплексе, который также подвергся диафорическим изменениям в условиях эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций. Известно, что содержание радиоактивных элементов в метаморфических породах изменяется в зависимости от термодинамических условий, протекающих во время образования этих пород, т.е. с увеличением температуры и давления концентрация урана и тория уменьшается (Смыслов, 1974). В Инчукалнской складчатой зоне, по отношению к соседним структурам, возможно более высокое содержание радиоактивных элементов, так как степень метаморфизма пород кристаллического фундамента этой зоны ниже, чем обрамляющих пород гранулитовой фации. Анализируя распределение радиоактивных элементов в пределах Инчукалнской складчатой зоны можно предположить, что породы, слагающие фундамент северной части этой зоны, в отличие от южной, формировались при других условиях, и



исходные породы обладали несколько повышенным содержанием радиоактивных элементов. Однако возможно и другое: после образования пород инчукалнского комплекса на юге зоны происходили восходящие вертикальные движения земной коры, в результате чего верхний термоактивный слой был эродирован.

Сопоставление эмпирических данных по теплогенерации пород, слагающих кровлю кристаллического фундамента, и измерению теплового потока в пределах отдельных геологических структур показывает, что прямой пропорциональной зависимости между этими параметрами в основном нет. Изменение величины потока в рассматриваемом районе колеблется в широких пределах: от 19 до 69 мВт/м<sup>2</sup> (рис. 2). Для Рижского плутона рапакиви-гранитов и анортозитов в целом характерны низкие значения. Минимальные значения, достигающие 19 мВт/м<sup>2</sup>, отмечаются на северо-западе (скв. Овиши-94). Повышение потока наблюдается в северо-восточной части (Курземский п-ов) и на юге плутона. Северная часть плутона сложена в основном гранитами рапакиви и характеризуется несколько повышенной генерацией радиогенного тепла со сравнительно однородным распределением по площади. Следовательно, объяснить прослеживающееся увеличение плотности потока в восточном направлении, наблюдаемое на поверхности, содержанием радиоактивных элементов не предоставляется возможным. Такое соотношение между тепловым потоком и теплогенерацией, видимо, обусловлено неодинаковой мощностью гранитов рапакиви в рассматриваемой части плутона (Урбан, Цыбуля, 1988). Если на северо-западе граниты рапакиви обладают очень малой мощностью и залегают на древних породах с незначительным содержанием урана и тория, то по мере продвижения к западному побережью Рижского залива мощность гранитов рапакиви возрастает, причем здесь, в более глубоких слоях земной коры, возможно наличие пород кислого состава. Южная зона плутона, где на поверхность фундамента выходят слаборадиоактивные породы габбро-норит анортозитового состава, по отношению к северо-западной, характеризуется повышенными значениями потока. Наблюдаемое увеличение потока, видимо, обусловлено повышенной генерацией тепла из пород, залегающих ниже габбро-норит-анортозитового комплекса. Это указывает на то, что по строению земная кора южной зоны отличается от северо-западной. Северная часть Западно-Литовского массива выделяется наибольшей величиной теплового потока — 69 мВт/м<sup>2</sup>. Однако слагающие фундамент породы занимают промежуточное значение по содержанию радиоактивных элементов. Чтобы выяснить причину наличия высокого потока в этом районе необходимо рассмотреть его распределение для Балтийской синеклизы в целом.

Ранее уже указывалось (Зуй и др., 1985; Цыбуля, Урбан, 1988), что для Западно-Литовского и Калининградского массивов характерны очень высокие потоки, достигающие 99 мВт/м<sup>2</sup> в центральной части Западно-Литовского массива (скв. Гаргждай-8). Повышенная плотность потока отмечается и на побережье Польши, западнее Гданьского залива (Майорович, Плева, 1982) и в южной части Швеции (район Сольстад) (Эрикссон, Мальмквист, 1982). На основании этого можно предположить существование в западной части Балтийской синеклизы единой зоны высоких тепловых потоков, включающей южную часть Балтийского моря, а также Западно-Литовский и Калининградский массивы. Сопоставляя величины теплового потока и теплогенерации в пределах этой зоны можно отметить, что здесь наблюдается прямая корреляция между этими параметрами, т. е. с увеличением количества радиогенного тепла плотность потока возрастает. Однако для компенсации наблюдаемого теплового потока этого количества тепла недостаточно, особенно в северной части Западно-Литовского массива (Урбан, Козел, 1989, в



Плотность теплового потока геологических структур Средней Прибалтики

| Скважина     | Номер на карте | Координаты |        | Интервал глубин, м | Температурный градиент, МК/м | Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К | Класс точности по Я. Б. Смирнову | Тепловой поток, мВт/м <sup>2</sup> |         |
|--------------|----------------|------------|--------|--------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------|
|              |                | С. Ш.      | В. Д.  |                    |                              |                                      |                                  | По интервалу                       | Средний |
| Екабпилс-51  | 46             | 56°13'     | 25°39' | 480—578            | 16,8                         | 1,72                                 | 2а                               | 29                                 | 32      |
|              |                |            |        | 578—675            | 21,6                         | 1,53                                 |                                  | 33                                 |         |
|              |                |            |        | 695—755            | 15,3                         | 2,14                                 |                                  | 33                                 |         |
|              |                |            |        | 755—800            | 21,7                         | 1,79                                 |                                  | 39                                 |         |
|              |                |            |        | 800—841            | 15,4                         | 2,02                                 |                                  | 31                                 |         |
| Стучка-50    | 45             | 56°20'     | 25°06' | 515—580            | 22,5                         | 1,87                                 | 2а                               | 42                                 | 36      |
|              |                |            |        | 591—683            | 14,8                         | 2,15                                 |                                  | 32                                 |         |
|              |                |            |        | 683—753            | 17,6                         | 2,09                                 |                                  | 37                                 |         |
| Скривери-102 | 44             | 56°36'     | 25°08' | 587—647            | 32,3                         | 1,71                                 | 2а                               | 55                                 | 55      |
|              |                |            |        | 689—750            | 19,2                         | 2,29                                 |                                  | 44                                 |         |
|              |                |            |        | 750—816            | 26,1                         | 1,95                                 |                                  | 51                                 |         |
|              |                |            |        | 821—890            | 26,7                         | 1,87                                 |                                  | 50                                 |         |
| Дзербене-100 | 15             | 57°06'     | 25°39' | 767—862            | 18,6                         | 2,02                                 | 2а                               | 38                                 | 43      |
|              |                |            |        | 873—922            | 21,8                         | 1,95                                 |                                  | 43                                 |         |
|              |                |            |        | 922—982            | 29,8                         | 1,72                                 |                                  | 51                                 |         |
| Аташине      | 49             | 56°31'     | 26°29' | 471—527            | 14,3                         | 2,01                                 | 2а                               | 29                                 | 31      |
|              |                |            |        | 527—620            | 18,0                         | 1,88                                 |                                  | 34                                 |         |
|              |                |            |        | 623—711            | 14,7                         | 2,18                                 |                                  | 32                                 |         |
|              |                |            |        | 720—827            | 14,0                         | 2,14                                 |                                  | 30                                 |         |
|              |                |            |        | 843—864            | 14,3                         | 2,10                                 |                                  | 30                                 |         |
| Лигатне      | 14             | 57°01'     | 25°26' | 352—407            | 23,3                         | 2,23                                 | 2а                               | 52                                 | 52      |
| Валка-404    | 4              | 57°41'     | 25°59' | 40—94              | 13,3                         | 2,40                                 | 1а                               | 32                                 | 32      |
| Алуксне-99   | 16             | 57°19'     | 26°57' | 644—705            | 17,2                         | 1,98                                 | 2а                               | 34                                 | 42      |
|              |                |            |        | 713—779            | 25,4                         | 1,75                                 |                                  | 44                                 |         |
|              |                |            |        | 779—824            | 28,9                         | 1,56                                 |                                  | 45                                 |         |
|              |                |            |        | 824—881            | 16,3                         | 2,29                                 |                                  | 37                                 |         |
|              |                |            |        | 896—939            | 19,8                         | 2,22                                 |                                  | 44                                 |         |
|              |                |            |        | 946—1015           | 21,4                         | 2,14                                 |                                  | 46                                 |         |
|              |                |            |        | 1015—1103          | 19,3                         | 2,16                                 |                                  | 42                                 |         |
| Рамси        | —              | 58°14'     | 25°24' | 60—90              | 13,3                         | 2,67                                 | 1а                               | 36                                 | 34      |
|              |                |            |        | 110—160            | 11,4                         | 2,78                                 |                                  | 32                                 |         |
|              |                |            |        | 160—210            | 14,4                         | 2,46                                 |                                  | 35                                 |         |
| Вильянди     | —              | 58°19'     | 25°18' | 180—220            | 14,2                         | 2,50                                 | 1а                               | 36                                 | 36      |

печати), что дает основание предположить об интенсивном поступлении тепла из мантии Земли. Следовательно, повышение тепловых потоков в пределах рассматриваемой части Балтийской синеклизы, по-видимому, вызвано тектоно-магматической активизацией, которая протекала в более позднее время по отношению к окружающим областям Восточно-Европейской платформы (Инданс, 1967; Богданов, 1968).

Инчукалнская складчатая зона пространственно в какой-то мере совпадает с аномалией повышенных потоков и только южная часть аномалии выходит за пределы этой зоны, охватывая частично Восточно-Латвийский гранито-гнейсовый блок, где установлена максимальная величина потока 57 мВт/м<sup>2</sup>. Сопоставляя наблюдаемый поток с имеющимися данными по теплогенерации (рис. 1, 2), можно предположить,



что характерное для северной части аномалии увеличение плотности потока обусловлено повышенной концентрацией радиоактивных элементов в верхнем слое земной коры. Однако величину теплового потока в южной части этой зоны невозможно объяснить полученным количеством радиогенного тепла, выделяемого из пород, которыми сложен кристаллический фундамент. Здесь, по аналогии с южной частью Рижского плутона (габбро-норит-анортозитовый комплекс), для компенсации наблюдаемого теплового потока необходимо допустить существование на глубине пород с повышенным содержанием радиоактивных элементов. Предположение о существовании в земной коре этих структур дополнительного слоя уже высказывалось ранее (Ковтун, Чичерина, 1985). В результате обобщения магнитотеллурических исследований, выполняемых в северо-западных районах Балтийской синеклизы, был установлен проводящий горизонт, кровля которого расположена примерно на глубине 20—50 км. Авторы полагают, что здесь возможно наличие области частичного расплава, образовавшегося при низких температурах из-за присутствия воды в надкритическом состоянии.

В центральной части архейского Латвийско-Эстонского массива отмечаются низкие значения потока 32—37 мВт/м<sup>2</sup>; небольшое увеличение прослеживается на северо-западе (район г. Пярну) — 51 мВт/м<sup>2</sup> и на юго-востоке (скв. Алуksне-99) — 42 мВт/м<sup>2</sup>. Повышение потока в районе г. Пярну обусловлено наличием в более глубоких слоях земной коры пород кислого состава, наличие которых здесь предполагается на основании интерпретации гравиметрического минимума (Кристаллический..., 1983). В юго-восточной части массива увеличение плотности потока, видимо, связано с повышенной генерацией тепла в верхних слоях земной коры (таблица).

Из всего изложенного материала можно сделать вывод, что распределение теплового потока и теплогенерации в пределах рассматриваемых структур зависит от условий их формирования, а также от глубинного строения земной коры. Приведенные рассуждения в целом не противоречат полученным результатам интерпретации других геофизических данных.

## ЛИТЕРАТУРА

- Богданов А. А. О тектоническом строении западного угла Европейской платформы // Вестн. Моск. ун-та, 1968, № 5, 3—11.
- Зуй В. И., Урбан Г. И., Веселко А. В. и др. Геотермические исследования в скважинах Калининградской области и Литовской ССР // Сейсмологические и геотермические исследования в Белоруссии. Минск, 1985, 88—94.
- Инданс А. П. Древнейшая структура Прибалтики // Вопросы геологии среднего и верхнего палеозоя Прибалтики. Рига, 1967, 245—259.
- Ковтун А. А., Чичерина Н. Д. Исследования в северо-западной части Русской платформы // Исследования теплового и электромагнитного полей в СССР. М., 1975, 61—68.
- Кристаллический фундамент Эстонии. М., 1983.
- Кутас Р. И. Поле тепловых потоков и термическая модель земной коры. Киев, 1978.
- Любимова Е. А., Старикова Р. Н., Шуштанов А. П. Теплофизические исследования горных пород // Геотермические исследования. М., 1964, 115—174.
- Майорович Я., Плева С. Изучение теплового потока в Польше и решение тектонофизических задач // Тепловое поле Европы. М., 1982, 261—276.
- Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н. Радиоактивные методы разведки. Л., 1965.
- Пуура В. А., Биркис А. П., Мотуза Г. Б. Тектоника кристаллического фундамента Прибалтийского региона // Тектонические исследования запада Восточно-Европейской платформы. Минск, 1984, 43—56.
- Смыслов А. А. Уран и торий в земной коре. Л., 1974.
- Урбан Г., Цыбуля Л. Тепловое поле Рижского плутона // Изв. АН ЭССР. Геол., 1988; 37, № 2, 49—54.



Урбан Г. И., Козел В. П. Геотермические условия северной части Западно-Литовского массива и его обрамления // Сейсмические и геотермические исследования Западной части СССР. Минск, 1989, (в печати).

Цыбуля Л. А., Урбан Г. И. Тепловое поле Балтийской синеклизы и некоторые аспекты его связи с глубинным строением земной коры // Комплексные исследования глубинного строения территории Белоруссии и смежных областей. Минск, 1988, 28—34.

Эрикссон К. Г., Мальмквист Д. Обзор прошлых и современных исследований теплового потока в Швеции // Тепловое поле Европы. М., 1982, 353—356.

Институт геохимии и геофизики  
Академии наук Белорусской ССР

Поступила в редакцию  
28/IV 1988

G. URBAN

## BALTI SINEKLIISI KRISTALSE ALUSKORRA STRUKTUURIDE SOOJUSVOOG JA RADIOGEENSE SOOJUSE GENEREERIMINE

Soojusvoog, mida mõõdeti kümnes puuraugus 40—1103 meetri sügavuses pealiskorra ja aluskorra kivimites kokku 33 korral, kõigub piirides 19—69 mW/m<sup>2</sup>. Aluskorra kivimite radiogeense soojuse genereerimise võimet hinnati 230 südamikuproovi laboriuuringute ja puuraukude radioaktiivse karotaaži andmetel. Võrreldi aluskorra erinevate plokkide soojuse genereerimise võimet ja mõõdetud soojusvoogu väärtusi.

G. URBAN

## THE HEAT FLOW AND GENERATION OF RADIOGENIC HEAT OF THE CRYSTAL BASEMENT STRUCTURES OF THE BALTIC SYNECLISE

The heat flow measured in ten boreholes at a depth of 40—1103 m in the upper and basement rocks for 33 times fluctuates from 19 to 69 mW/m<sup>2</sup>.

The radiogenic heat generated by the basement rocks was estimated on the basis of laboratory investigations and borehole radioactive logging of 230 cores. The heat generation capacity of different blocks of the basement and the values of heat flow were compared.