

СВЯЗЬ КОНДУКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА С ИЗОТОПНЫМ СОСТАВОМ ГЕЛИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ФЛЮИДАХ

Иоффе А.И., Поляк Б.Г.

Геологический институт РАН, Москва, Россия

e-mail: ai.ioffe39@gmail.com, polyak@ginras.ru

Исследованы региональные особенности корреляции между плотностью кондуктивного теплопотока из недр Земли (q) и отношением концентраций изотопов гелия ($^3\text{He}/^4\text{He}=R$) в подземных флюидах. Результаты, полученные как в районах новейшего вулканизма (Япония, Италия), так и вне их (Центральная Европа), показывают, что можно достаточно уверенно говорить о положительной корреляции исследуемых параметров. Это поддерживает вывод о такой же связи фоновых (региональных средних) значений q и R , обнаруженной ранее в разновозрастных структурных элементах континентальной коры.

Ключевые слова: кондуктивный теплопоток, изотопы гелия, корреляция, Япония, Италия, Центральная Европа.

Correlation between the density of conductive heat flow from the interior (q) and the concentration ratio of helium isotopes ($^3\text{He}/^4\text{He}=R$) in underground fluids was studied in the different regions. The results obtained both in the areas of recent volcanism (Japan, Italy) and outside (Central Europe) show that one can say confidently enough about the positive correlation between the parameters investigated. It supports the conclusion on the same connection between the background (regional average) q - an R -values found in the diverse in age structural units of the continental crust.

Keywords: conductive heat flow, helium isotopes, correlation, Japan, Italy, Central Europe.

Тепловой поток из недр, отражая суммарный энергетический эффект всех глубинных процессов, количественно ограничивает круг реалистических геотектонических моделей, описывающих структурно-вещественную эволюцию земных оболочек. Именно поэтому его определение, реконструкция, картирование и выяснение природы имеют в науках о Земле первостепенное значение.

Еще в 1954г. при очень немногих тогда определениях величины кондуктивного теплопотока q в скважинах Ф.Берч заметил, «...что существуют вариации теплового потока, связанные с физическими и химическими вариациями регионального масштаба» [1]. Последующий анализ латеральных вариаций его плотности q показал, что она уменьшается обратно пропорционально возрасту, t , тектономагматической активности в исследуемом блоке земной коры [2-6]. Этот вывод неоднократно проверялся и уточнялся под названием “*heat flow–age dependence*” [7-11]. По мере накопления новых данных различие измеренных в разных пунктах частных значений q затушевывало этот генеральный тренд.

Оно даже привело к сомнениям в самом его существовании в фанерозойской континентальной коре [12], которые, однако, были опровергнуты осреднением данных в крупных возрастных провинциях материков [13].

Разброс «одновозрастных» частных значений q , наблюдаемых на континентах, обусловлен факторами, возмущающими глубинный тепловой поток у поверхности Земли, а именно ее рельефом, морфологией разных по теплопроводности геологических тел, изменениями климата, циркуляцией подземных флюидов, тектоническими перемещениями горных масс и пр. При осреднении результатов определений q в пределах крупного однородного геоблока (структурно-тектонической единицы) противоположные по знаку локальные эффекты каждого из этих возмущающих факторов в той или иной мере взаимно компенсируются. Поэтому региональные средние, т.е. фоновые оценки q ближе к ее неискаженной глубинной величине.

Но наблюдаемый тренд говорит лишь о присутствии местами в недрах Земли временных источников тепла. Он позволяет

идентифицировать такие источники только с теплофизической стороны традиционным для геофизики путем решения обратных задач, когда подбираются отвечающие темпу изменения q мощность источника, его размеры, глубина залегания и время существования. Геологическая природа источников при таком подходе остается неизвестной, и они априорно отождествляются с поднятиями горячего мантийного вещества (астеносферными диапирами). Доказать справедливость этого допущения могло бы только выявление прямых вещественных признаков внедрения такого вещества в зонах повышенного теплового потока.

В свете представлений о геотермической роли радиоактивности казался естественным анализ ее не только геоэнергетических, но и материальных последствий, выражающихся в генерации радиогенных изотопов ^{40}Ar и ^4He [14]. Однако изучение геохимии гелия вскрыло резкое различие изотопного состава гелия, образующегося благодаря распаду U и Th в земной коре и присутствующего в дериватах мантии, – вулканических газах, океанических базальтах и т.п. В «коровом» гелии отношение концентрации его изотопов $^3\text{He}/^4\text{He} = R \approx (1 \div 3) \times 10^{-8}$, тогда как в «мантийном» оно выше на три порядка – $R_{\text{ман}} \sim (1.2 \div 5) \times 10^{-5}$ – из-за примеси захваченного при аккреции первозданного («космического») гелия с отношением $R_{\text{пер}} \sim 10^{-4}$ [15].

Дальнейшие региональные исследования выявили в подземных флюидах суши тектоническую упорядоченность изотопного состава гелия, сходную с обнаруженной ранее в вариациях плотности кондуктивного теплопотока [16,17]. Это побудило исследовать непосредственно соотношение экспериментально измеренных значений R и q в конкретных пунктах, что и обсуждается в данной работе.

Заключение о характере связи этих параметров можно сделать, вычислив соответствующий коэффициент корреляции r [18]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - X)(y_i - Y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - X)^2 \sum_{i=1}^N (y_i - Y)^2}}, \quad (1)$$

где N – количество измерений в выборке,

X – среднее значение величины x , принимающей различные значения x_i , Y – среднее значение величины y (со значениями y_i).

Такой расчет был бы оправдан, если бы измерения обоих параметров проводились в одних и тех же точках земной поверхности. Однако таких измерений практически нет.

Поэтому была сделана попытка решить задачу следующим образом: ввести некоторую величину ρ («радиус совпадения») и считать измерения в точках, попадающих в круг такого радиуса, проведенными в одном и том же месте. Однако даже при $\rho = 4'$ (минуты географических координат по широте и долготе) таких «совпадающих» точек оказывается довольно мало даже в относительно подробно исследованных районах.

Наиболее хорошо изученным по обоим параметрам районом, достаточно представительным для региональных выводов, является Япония. Рисунок 1 характеризует изученность этих параметров на о-вах Хонсю, Сикоку и Кюсю, где определено 485 значений плотности q теплового потока (включая измерения в море) и 327 величин отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$.

Приведем результаты «прямого» расчета таким методом коэффициента корреляции между R и q на территории Японии. Коэффициент корреляции при таком расчете с использованием точек, расположенных в данном районе, оказывается при $\rho = 2'$ равным 0.55. Однако при этом надо иметь в виду, что, если производится несколько измерений одного и того же параметра в некоторой точке, то при отборе второго параметра, измерения которого попадают внутрь «круга совпадения», туда попадает несколько одних и тех же точек этого второго параметра, что искажает результаты для коэффициента корреляции. Так, при $\rho = 2'$ для расчета отбирается 54 точки R , но при этом используется лишь 12 различных точек q .

Если применить для оценки статистической значимости этой величины известную таблицу доверительных границ выборочного коэффициента корреляции [19, стр. 138], то для выборки из 12 значений (с числом степеней свободы $f = n - 2 = 10$) критическим значением r при 5%-ной двусторонней границе является 0.576. Оно больше, чем приведенное

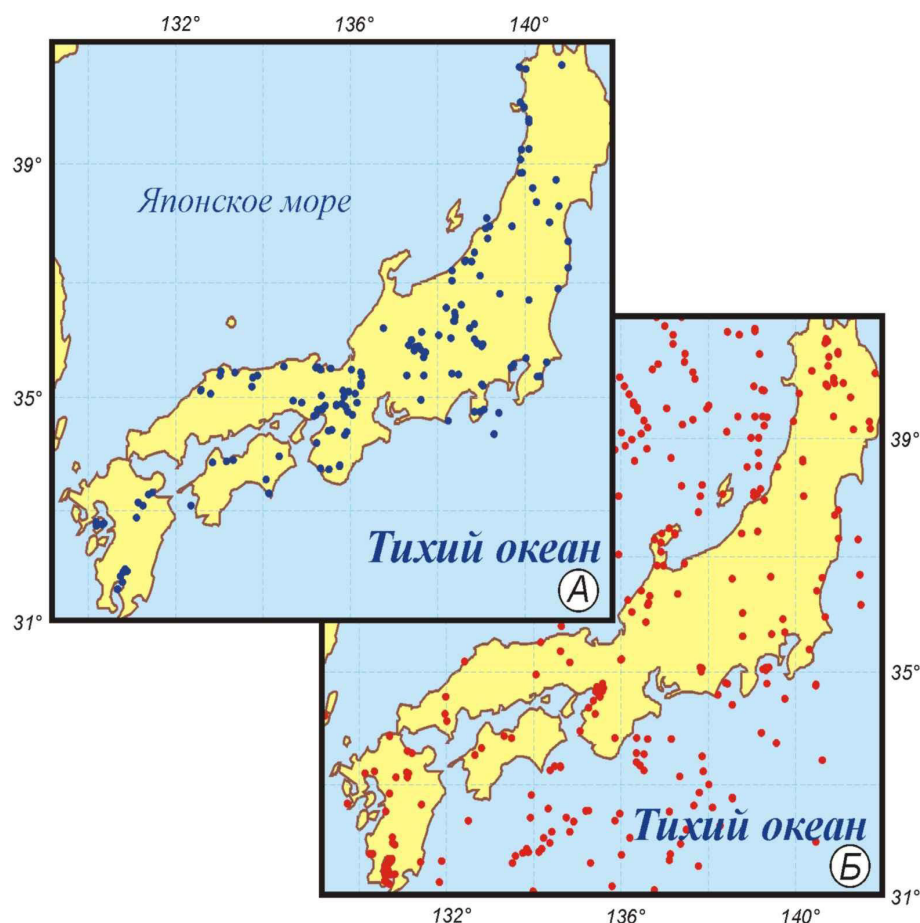


Рис. 1. Пункты измерения на территории Японии отношения концентраций изотопов гелия (А) и плотности кондуктивного теплового потока (Б), проекция Меркатора

выше вычисленное значение $r=0.55$, так что последнее, будучи статистически незначимым, не позволяет судить о наличии и характере связи R и q . Но при $\rho=4'$ вычисленное значение r равно 0.61, а при $\rho=6'$ оно составляет 0.65. Оба они больше критического значения коэффициента корреляции $r_{\text{крит},0.05}=0.576$, указывая на существование в Японии статистически значимой положительной связи между R и q .

В хуже изученных районах (с меньшей плотностью измерений и их неравномерным распределением) такой метод поиска связи R и q может оказаться неэффективным. Поэтому была предпринята попытка решить задачу и другим способом. Поле (под понятием «поле» подразумевается функция, определяющая значение R или q в любой точке исследуемого района) параметра с лучшим покрытием по площади экспериментальными точками аппроксимировалось методом наименьших квадратов некоторой функцией, затем значения этого поля в точках проведения измерений второго параметра вычислялись с

использованием этой функции, и по составленному таким образом набору измерений двух параметров определялось значение r .

Приведем пример такого расчета в одном из наиболее изученных по обоим параметрам районов Италии (рис. 2). В этом районе имеется 26 измерений плотности q теплового потока и 105 измерений величин отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$.

Поле $R(\lambda, \varphi)$ аппроксимировалось выражением

$$R(\lambda, \varphi) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \cos(b_x i \lambda) \cos(b_y j \varphi), \quad (2)$$

где n – количество использованных «гармоник» по широте и долготе, λ – долгота точки на поверхности, φ – широта точки, b_x и b_y – некоторые коэффициенты, которые задаются методом подбора и, в принципе, могут влиять на «качество» аппроксимации). Коэффициенты a_{ij} находятся решением соответствующей системы нормальных линейных алгебраических уравнений. Расчеты по уравнению (2)

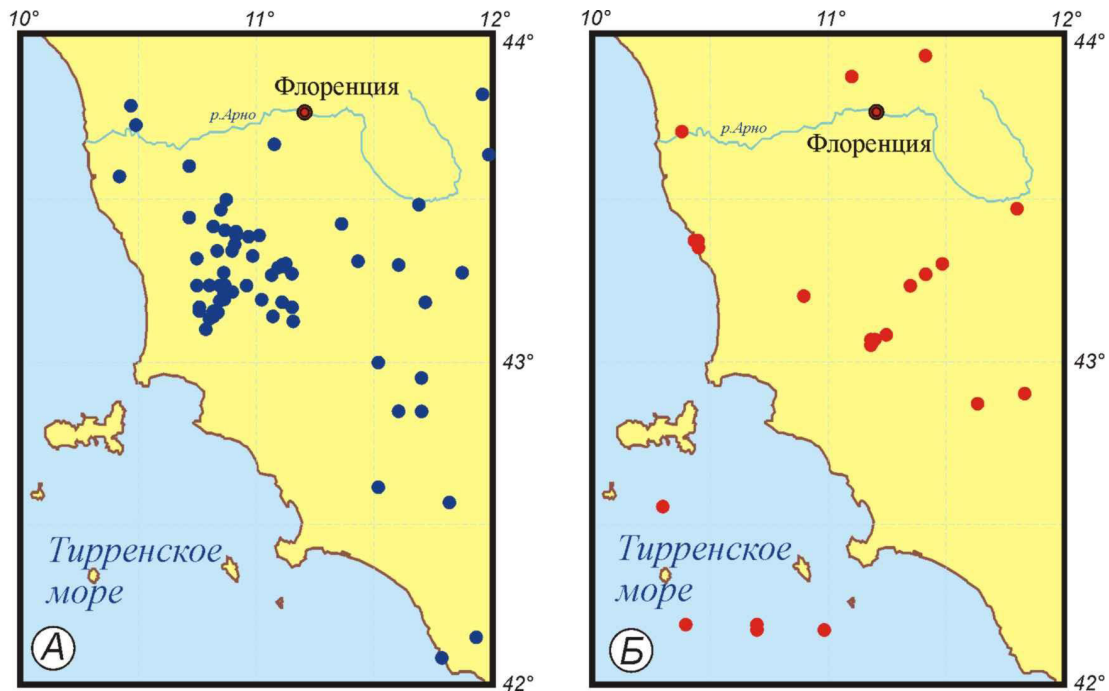


Рис. 2. Изученность изотопного состава гелия в газах (А) и плотности теплового потока (Б) в итальянской провинции Тоскана, проекция Меркатора

при числе использованных «гармоник» n от 4 до 10 дали значения коэффициента корреляции r в диапазоне от 0.867 до 0.755.

Для контроля приведем результаты расчета, полученные при использовании тех же исходных точек в том же районе, но при другом выборе аппроксимирующей функции; в этом случае

$$R(x, y) = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^{p-i} \beta_{ij} x^i y^{j-i}, \quad (3)$$

где p – степень аппроксимирующего полинома, x и y – декартовы координаты точки на поверхности. Коэффициенты β_{ij} также находятся решением соответствующей системы линейных алгебраических уравнений. При проведении расчета с использованием выражения (3) географические координаты точек предварительно преобразовывались в декар-

товы координаты карты в проекции Меркатора. В этом случае аппроксимация по уравнению (3) полиномом от 5-й до 10-й степени дала значения коэффициента корреляции в диапазоне от 0.146 до 0.259, причем изменения значений этой величины не были монотонными.

Для всех приведенных здесь результатов упоминавшееся среднее квадратичное отклонение (см. примечание¹⁾) монотонно уменьшается при увеличении числа гармоник в выражении (2) или степени полинома в выражении (3). Но рассчитываемый при этом коэффициент корреляции ведет себя не монотонно, а иногда даже появляются заметные «отскоки»; это, видимо, связано с самой процедурой аппроксимации и использованием ее результатов при расчете интересующего нас параметра для двух полей. В целом же тенденция поведения коэффициента корреляции

¹⁾ Под «качеством» аппроксимации мы просто понимали тот факт, что среднее квадратичное отклонение для точек, полученных с использованием выражения

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N (R(x_i, y_i) - R_{ap}(x_i, y_i))^2 / N},$$

было меньше, чем при использовании других аппроксимирующих функций. В этом выражении N – количество «экспериментальных» точек $R(x_i, y_i)$, использованных при построении системы нормальных линейных алгебраических уравнений, а $R_{ap}(x_i, y_i)$ – аппроксимированные значения R , вычисленные в тех же точках (x_i, y_i) .

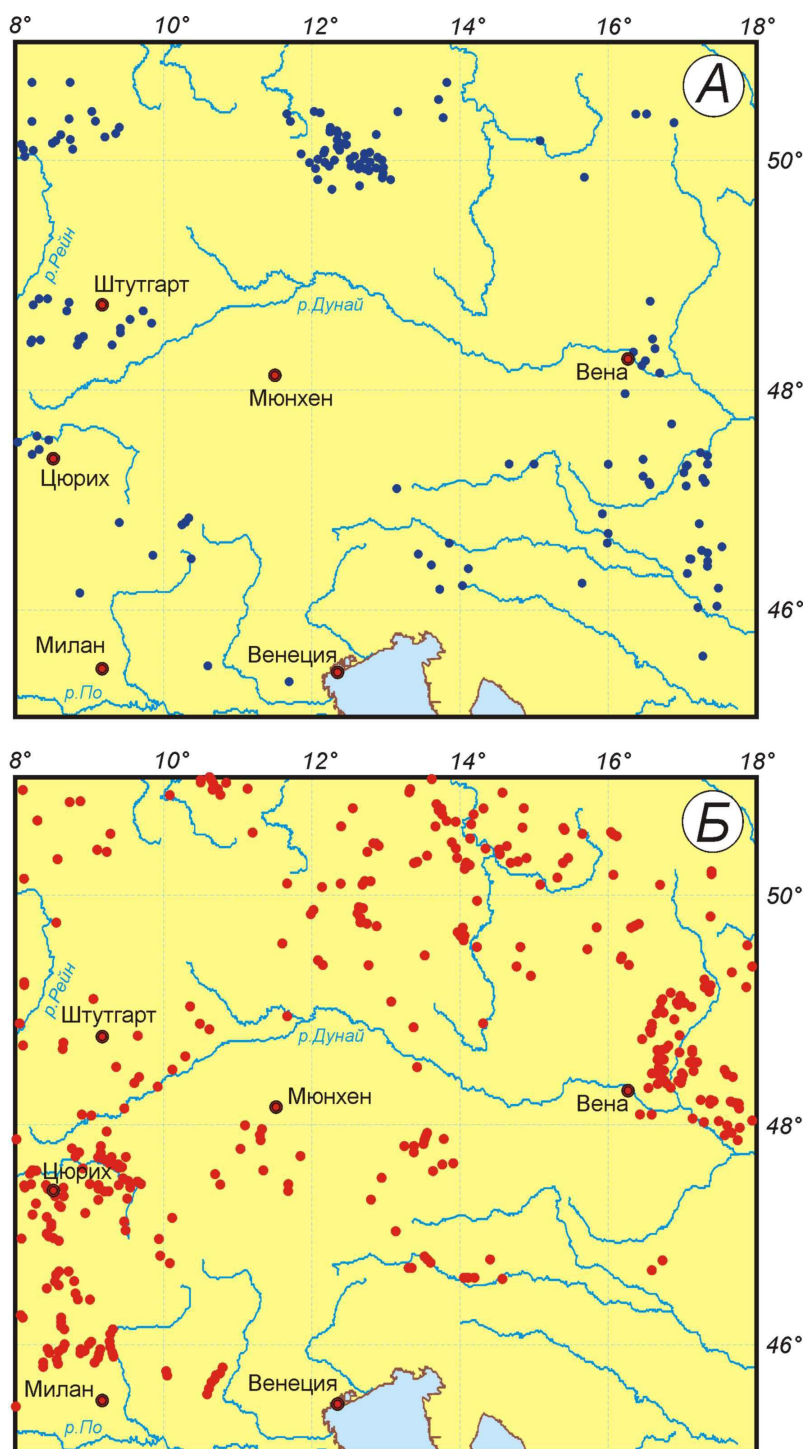


Рис. 3. Изученность изотопного состава гелия в газах (А) и теплового потока (Б) в Центральной Европе, проекция Меркатора

достаточно очевидна: в обоих вариантах расчета r его значения оказываются положительными, что указывает на симбатный характер связи кондуктивного теплототока с изотопным составом гелия и на территории Италии.

Но такая связь отличает вовсе не только, как можно подумать, районы активного вулканизма. Приведем пример подобных расчетов для Центральной Европы.

Как видно из рис. 3, этот район в целом достаточно хорошо обеспечен данными измерений обоих параметров (660 измерений плотности q теплового потока и 341 измерений величин отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$), но точки измерения расположены крайне неоднородно по площади (покрытие района точками измерений теплового потока выглядит все-таки более равномерным).

Для аппроксимации мы использовали выражение (3), т.к. при этом «качество» аппроксимации оказывалось выше, чем при использовании, например, выражения (2). При расчете по приведенному выше алгоритму (аппроксимировалось поле R при различных степенях аппроксимирующего полинома) были получены значения коэффициента корреляции в диапазоне от 0.542 до 0.701.

Учитывая неравномерность распределения экспериментальных точек, мы провели еще и контрольный «расчет наоборот»: сначала аппроксимировалось поле теплового потока (выражение (3)), а потом точки с измерениями R использовались для вычисления коэффициента корреляции; при этом значения r оказались в диапазоне от 0.444 до 0.645. В обоих вариантах расчета полученные пары предельных значений r намного больше критических для выборок, равных по объему рассмотренным (0.11–0.08).

Заметим, что использование выражения (3) для оценки связи R и q на уже рассмотренных выше Японских островах не только подтвердило вывод, полученный расчетами с «радиусом совпадения» $\rho \geq 4'$, но дало еще большее значение коэффициента корреляции: в пределах $0.83 \div 0.85$ в зависимости от степени полинома.

Полученные результаты показывают, что можно достаточно уверенно говорить о положительной корреляции результатов измерений плотности теплового потока и изотопного состава гелия в земных газах. Они поддерживают вывод о такой же связи фоновых (региональных средних) значений R и q , обнаруженной еще 30 лет назад на территории СССР [16,17] и подтвержденной в

Японии [20]. Найденное в первых работах методом «сокращенной главной оси» [21] уравнение линии регрессии позволяет ориентировочно оценивать плотность фонового теплового потока в пунктах определения R . Прогностические возможности найденной корреляции были проверены в Чехии [22], Китае [23], Киргизии [24], Прибайкалье [25] и реализованы в Мексике [26] и Монголии [27].

Вариации исследованных параметров нельзя связывать с распадом U и Th в породах, т.к. фоновый теплопоток растет с ростом отношения ${}^3He/{}^4He=R$, т.е. с уменьшением, а не увеличением доли в гелии радиогенного изотопа 4He . Тем самым, эта уникальная корреляция геофизического и геохимического параметров проливает свет на источники глубинного тепла и механизмы тепломассопереноса в недрах Земли.

Приведенные в работе результаты получены с использованием программного обеспечения, разработанного авторами, и глобальных банков изотопно-гелиевых и геотермических данных, созданных при их участии [28-30 и др.].

Мы весьма признательны М.Д.Хуторскому (ГИН РАН) за ценные советы и конструктивную критику первоначального варианта рукописи и благодарим Е.Н.Александрову за подготовку рисунков к печати.

Работа выполнена благодаря поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-05-00082) и Программы №8 Отделения наук о Земле РАН «Взаимодействие геосфер: геофизические поля и массоперенос» (проект №9).

Мы весьма признательны М.Д. Хуторскому (ГИН РАН) за ценные советы и конструктивную критику первоначального варианта рукописи и благодарим Е.Н. Александрову за подготовку рисунков к печати.

Работа выполнена благодаря поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-05-00082) и Программы № 8 Отделения наук о Земле РАН «Взаимодействие геосфер: геофизические поля и массоперенос» (проект № 9).

Список литературы

1. Birch F. (1954) The present state of geothermal investigation // Geophysics, 19, no. 4, P. 645-659.
2. Lee W.H.R. and Uyeda S. (1965) Review of heat flow data // In: "Terrestrial heat flow" (AGU monograph no. 8, W.H.R. Lee, Ed.), Washington, P. 87-190.

3. Поляк Б.Г., Смирнов Я.Б. (1966) Тепловой поток на континентах // Доклады АН СССР, 168, №1, С. 170-172.
4. Поляк Б.Г., Смирнов Я.Б. (1968) Связь глубинного теплового потока с тектоническим строением континентов // Геотектоника, № 4, С. 3-19.
5. Hamza V.M. and Verma R.K. (1969) The relationship of heat flow with the age of basement rocks // Bull. volcanol., 33, no. 1, P. 123-152.
6. Sclater J. and Francheteau J. (1970) The implication of terrestrial heat flow observations on current tectonics and geochemical models of the crust and upper mantle of the earth // Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 20, no. 5, P. 509-542.
7. Cermak V. (1976) Heat flow investigation in Czechoslovakia // In: "Geoelectric and Geothermal Studies" (KAPG Geophys. Monogr., A. Adam, ed.) Budapest, Akad. Kiado, P. 414-424.
8. Chapman D. and Pollack H. (1976) Global heat flow: a new look // Earth. Planet. Sci. Lett., 28, no. 1, P. 23-32.
9. Kutas R.I., Lubimova E.A., SMirnov Ya. B. (1976) Heat flow map of the European part of the USSR and its geological and geophysical interpretation // "In: Geoelectric and Geothermal Studies" (KAPG Geophys. Monogr., A. Adam, ed.) Budapest, Akad. Kiado, P. 443-449.
10. Chapman D. and Furlong K. (1977) Continental heat flow-age relationships // Eos, Trans. Amer. Geophys. Un., 58, P. 1240-1251.
11. Vitorello I. and Pollack H. (1980) On the variation of continental heat flow with age and thermal evolution of continents // J. Geophys. Res., 85, P. 983-995.
12. Rao R.U.M., Rao G.V. and Reddy G.K. (1982) A dependence of continental heat flow – fantasy and facts // Earth. Planet. Sci. Lett., 59, no. 2, P. 288-302.
13. Sclater J., Parsons B. and Jaupart C. (1981) The heat flow through oceanic and continental crust and heat losses from the Earth // J. Geophys. Res., 86, P. 11535-11552.
14. Булашевич Ю.П. О связи выделения He и Ar из мантии с термической эволюцией Земли // Доклады АН СССР, 1974, 216, 5: С. 1026-1029.
15. Мамырин Б.А., Толстихин И.Н. (1981) Изотопы гелия в природе. М.: Энергоиздат. 222 с.
16. Поляк Б.Г., Толстихин И.Н., Якуцени В.П. (1979) Изотопный состав гелия и тепловой поток – геохимический и геофизический аспекты тектогенеза // Геотектоника, №5, С. 3-23.
17. Polyak B.G. and Tolstikhin I.N. Isotopic composition of the Earth's helium and the motive forces of tectogenesis // Chem. Geology, 1985, v.52, P. 9-33.
18. Худсон Д. Статистика для физиков. Мир, М. 1970.
19. Pearson E.S. and Hartley H.O. Biometrika, Tables for Statisticians, v.1, Cambridge Univ. Press, 1954, Table 13, P. 138.
20. Sano Y., Tominaga T., Nakamura Y., and Wakita H. $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in methane-rich gases in Japan Geochem. Journ., 1982, 16, P. 237-245.
21. Миллер Р.Д., Кан Дж.С. Статистический анализ в геологических науках. М.: «Мир», 1965. 481 с.
22. Polyak B.G., Prasolov E.M., Cermak V. and Verkhovsky A.B. (1985) Isotopic composition of noble gases in geothermal fluids of the Krusne Hory Mts. (Czechoslovakia) and geothermal anomaly // Geochim. et cosmochim. acta, 1985, v.49, P. 695-699.
23. Zhang X., Xu Y., Sun M., Cheng K., Lu W., Li X., Ma L. Discovery and its geological significance of mantle-derived helium in the inclusion of the Ordovician oil-bearing reservoir rocks in the Huanghua depression, China // Science in China Ser. D Earth Sci., 2004, vol. 47, №1, P. 23-29.
24. Дучков А.Д., Шварцман Ю.Г., Соколова Л.С. Глубинный тепловой поток Тянь-Шаня: достижения и проблемы // Геол. и геофиз., 2001, 42, №10, С. 1516-1531.
25. Лысак С.В., Писарский Б.И. Оценка теплового потока по изотопам гелия в газовом составе подземных вод Байкальской рифтовой зоны и окружающих районов // Вулканол. и сейсмол., 1999, №3, С. 45-55.
26. Polyak B.G., Prasolov E.M., Kononov V.I., Verkhovskiy A.B. Gonzalez A., Templos L.A., Espindola J.M., Arellano J.M., Manon A. Isotopic composition and concentration of inert gases in Mexican hydrothermal systems // Geofisica Internacional, 1982, v.21/3, P. 193-227.
27. Хуторской М.Д. Геотермия Центрально-Азиатского складчатого пояса. М.: РУДН, 1996. 289 с.
28. <http://pubs.usgs.gov/ds/2006/202/htdocs/NogaDat-V1.0%20-%200629006.xls>.
29. http://www.wdcb.ru/sep/heat_flow/hf_cat_gl.ru.html.
30. <http://www.heatflow.und.edu>.