

## **Оценка потенциальной геотермальной энергии и величины радиотеплогенерации осадочной толщи Кизлярского месторождения**

О.А. Маммаев, Б.О. Маммаев  
ИПГ ДНЦ РАН, ИГ ДНЦ РАН

Прогнозирование новых альтернативных возобновляемых, экологически безопасных источников энергии, их поиск и оценка на фоне убывающих запасов традиционных углеводородных источников общепризнанно является актуальной научной и практической проблемой в XXI веке для человечества.

Одним из таких источников энергии при технологически совершенном и комплексном использовании являются геотермальные месторождения глубинного тепла Земли. Восточное Предкавказье по запасам ценных геотермальных ресурсов и перспективам их практического применения является одним из уникальных регионов страны.

В связи с оценкой возобновляемой геотермальной энергии глубинного тепла Земли, очень важно на примере конкретного месторождения проанализировать природу составляющих теплового потока, наблюдаемого на поверхности и выяснить вклад в эту энергию процессов радиотеплогенерации за счет радиоактивного распада естественных радиоактивных элементов урана, тория, калия в осадочных горных породах и консолидированных слоях земной коры.

По современным научным представлениям основным источником внутренней энергии недр Земли являются содержащиеся в горных породах и пластовых водах естественные радиоактивные элементы (ЕРЭ).

В данной работе, используя результаты собственных исследований, а также фондовые и литературные данные, проведена попытка анализа составляющих и оценки потенциальной геотермальной энергии с выяснением вклада процессов радиотеплогенерации в осадочной толще на примере Кизлярского геотермального месторождения.

В качестве расчетной ячейки нами выбран объем осадочной толщи и пластовых вод, заключенных в объеме  $125 \text{ км}^3$ . При принятой мощности осадочной толщи до глубины 5 км, размер площади рассматриваемой ячейки соизмерим с площадью г. Кизляр ( $5 \times 5 \text{ км}$ ) и составляет большую часть Кизлярского геотермального месторождения.

### **1. Расчет величины радиотеплогенерации осадочной толщи**

Определение теплового потока дает наиболее полную информацию о тепловом состоянии Земли, изучение которого необходимо для решения многих геологических, геофизических и геотермических проблем.

Наблюдаемый у поверхности Земли тепловой поток, хотя и имеет глубинное происхождение, деформируется в литосфере вследствие происходящих в ней различных геологических процессов, сопровождающихся генерацией или поглощением тепловой энергии, а также перераспределением тепла движущимися подземными водами. При оценке этих факторов в формировании естественного теплового поля литосферы можно выделить среди них главные и второстепенные.

Наряду с экспериментальным значением величины реально наблюдаемого в разрезе кондуктивного теплового потока, требуется анализ роли различных источников глубинного тепла – их мощности, распределения изотопов в разрезе и по площади. Первоочередным фактором в этом отношении является явление радиоактивного распада естественных радиоактивных элементов (U, Th, K).

Радиоактивность осадочных пород в первую очередь характеризуется наличием в их составе калия и уран-ториевых элементов. По данным [12] Н.С. Боганика и В.Н. Кабрановой, осадочные породы по степени радиоактивности объединяются в три группы:

1. Породы с низкой радиоактивностью, к которым относятся хорошо отсортированные и слабо сцементированные мономинеральные кварцевые пески, песчаники, алевролиты, чистые известняки, доломиты;
2. Породы с повышенной радиоактивностью – глинистые разности осадочных пород (глинистые пески, песчаники, алевролиты, глинистые известняки и доломиты), а также породы с органическими примесями;
3. Породы с высокой радиоактивностью – калийные соли, моноцитовые и ортитовые пески, глубоководные глины, глобичериновые илы.

Вклад радиогенного тепла в тепловое поле земной коры исследовался на конкретном материале Восточного Предкавказья (Дагестан), геологическое строение которого достаточно хорошо изучено. Имеющиеся данные о распределении радиоактивных элементов в литологических горизонтах и теплофизические свойства слагающих их пород положены в основу наших исследований [9]. Содержание радиоактивных элементов в литологических разностях Кизлярского месторождения (табл. 1) неравномерно как по площади, так и по вертикали. Литологический состав осадочной толщи приведен на Рис. 1.

Следовательно, осадочный комплекс пород при определении в нем генерируемого радиогенного тепла нельзя принимать за однородный слой. Поэтому нами использовался метод послыного определения радиогенного тепла (ПОРТ) [12]. В состав осадочного чехла Прикумской зоны входят породы разных воз-

растов от палеозойского до четвертичного. Причем содержание в них радиоактивных элементов существенно колеблется. Таблица 1 составлена на основе фактических данных о содержании радиоактивных элементов в породах осадочной толщи района исследований, представленной из фондовых данных.

Таблица 1

Оценка величины радиотеплогенерации в осадочной толще кизлярского месторождения

Возраст отложенный	Глубина залегания, $H$ м	Литологический состав	Мощность пород, $h$ м	Плотность пород, $\rho$ $\text{кг/м}^3 \times 10^3$	U $10^{-4}\%$	Th $10^{-4}\%$	K %	A $\text{мкВт/м}^3$	Q $\text{мкВт/м}^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q <sub>IV</sub>	80	Глины	80	2.4	3	5.8	2.0	1.24	99.2
	150	Пески	70	2.0	3	8	2.4	1.18	82.6
	280	Глины	130	2.48	3	5.8	2.0	1.28	166.4
	380	Пески	100	2.0	3	8	2.4	1.18	118.0
	430	Глины	50	2.48	3	5.8	2.0	1.28	64.0
Q <sub>I-III</sub>	550	Пески	120	2.0	3	8	2.4	1.18	141.6
	630	Глины	80	2.49	3	5.8	2.0	1.28	102.4
N <sub>2</sub> ap	730	Пески	100	2.0	3	6	2	1.05	105.0
	930	Глины	200	2.50	3	6	2	1.30	260.0
	1020	Пески	90	2.0	3	6	2	1.05	94.5
	1080	Глины	60	2.50	3	6	2	1.30	78.0
	1200	Пески	120	2.0	3	6	2	1.05	126.0
	1300	Глины	100	2.50	3	6	2	1.30	130.0
	1490	Пески	190	2.0	3	6	2	1.05	199.5
	1600	Глины	100	2.50	3	6	2	1.30	130.0
N <sub>2</sub> ak	1660	Пески	60	2.0	3	6	2	1.05	63.0
	1800	Глины	140	2.50	3	9	0.7	1.38	193.2
Контин-толща N <sub>2</sub> P	1900	Пески	100	2.0	3	9	0.7	1.11	111.0
	2000	Глины	100	2.50	3	9	2.0	1.50	150.0
	2130	Песчаники	130	2.02	3	9	2.0	1.22	158.6
N <sub>1m</sub>	2180	Глины	50	2.50	3	9	2.0	1.50	75.0
	2250	Пески	70	2.0	5.1	10.3	2.0	1.68	117.6
N <sub>1</sub> s	2370	Песчаники	120	2.02	5.1	10.3	2.0	1.71	205.2
	2530	Глины, алевролиты	160	2.07	5.1	10.3	2.0	1.74	278.4
	2650	Песчаники	120	2.02	5.1	10.3	2.0	1.71	205.2
	2800	Глины, алевролиты	150	2.07	5.1	10.3	2.0	1.74	261.0
N <sub>1</sub> kg	2870	Песчаники	70	2.02	5.1	10.3	2.0	1.71	119.7
	2920	Глины	50	2.50	3	5.1	2.0	1.24	62.0
	3000	Пески	80	2.0	3	5.1	2.0	1.0	80.0
N <sub>1</sub> ch	3080	Песчаники	80	2.02	3	5.1	2.0	1.01	80.8
	3150	Глины	70	2.54	3	5.1	2.0	1.27	88.9
	3220	Пески	70	2.02	3	5.1	2.0	1.01	70.7
	3250	Глины	30	2.54	3	5.1	2.0	1.27	38.1
P <sub>3</sub> + N <sub>1</sub>	3310	Пески	60	2.02	3	5.1	2.0	1.01	60.6
	3580	Глины	270	2.54	3.5	7.93	2.3	1.62	437.4
	3630	Песчаники	50	2.02	3.2	6.7	2.1	1.15	57.5
	3800	Глины, алевролиты	170	2.07	3.0	10	2.2	1.34	227.8
	3830	Песчаники	30	2.02	3.2	6.7	2.1	1.15	34.5
P <sub>1</sub>	4350	Глины	20	2.54	3.5	7.93	2.3	1.62	32.4
	4480	Мергели	130	2.40	4.2	7.1	0.4	1.47	191.1
P <sub>2</sub>	4550	Известняки	70	2.46	3	7	0.1	1.18	84.0
K <sub>2</sub>	4660	Мергели	110	2.40	2.3	3	0.3	0.73	83.6
	5000	Известняки	450	2.46	2.3	3	0.3	0.73	328.0
ИТОГО:									5792.5

Расчетные данные по радиотеплогенерации в породах осадочной толщи до глубины залегания 5 км приведены в данной таблице. Величина радиотеплогенерации в породах осадочной толщи (A) рассчитана по формуле:

$$A = 0.133 \rho (0.73U + 0.20Th + 0.27K), \quad (1)$$

где A – радиотеплогенерация в горных породах в  $\text{мкВт/м}^3$ ;

$\rho$  – плотность пород в  $г/см^3$ ;

$U, Th$  – содержание радиоактивных элементов в  $г/т$ ,

$K$  – содержание в %.

Теплофизические параметры горных пород осадочной толщи Кизлярского месторождения заимствованы из фондовых геологических и литературных данных. Масштабные исследования теплофизических параметров горных пород и изучение теплового потока осадочной толщи Прикумского и Прикаспийского регионов были проведены в Институте физики Дагестанского филиала АН СССР под руководством члена-корр. Х.И. Амирханова [3,5,7,8 и др.].

Как видно из табл. 1 разброс значений радиотеплогенерации (А) в осадочных породах Кизлярского месторождения для различных литологических разностей находится в пределах 0.76 – для мергелей верхнего мела, до 1.74 – для глин и алевролитов сарматских отложений. В целом радиотеплогенерация в горных породах относительно равномерная. Если принять согласно [8] среднее значение теплового потока ( $q_{cp}$ ) для Кизлярского месторождения равным  $63 \text{ мВт/м}^2$ , то доля радиотеплогенерации в слое осадочных пород до глубины 5 км приблизительно  $5.8 \text{ мВт/м}^2$  составит около 9.2 % от наблюдаемого на поверхности теплового потока.

Такие значения согласуются со значениями наблюдаемыми и в других регионах, в том числе по Дагестану.

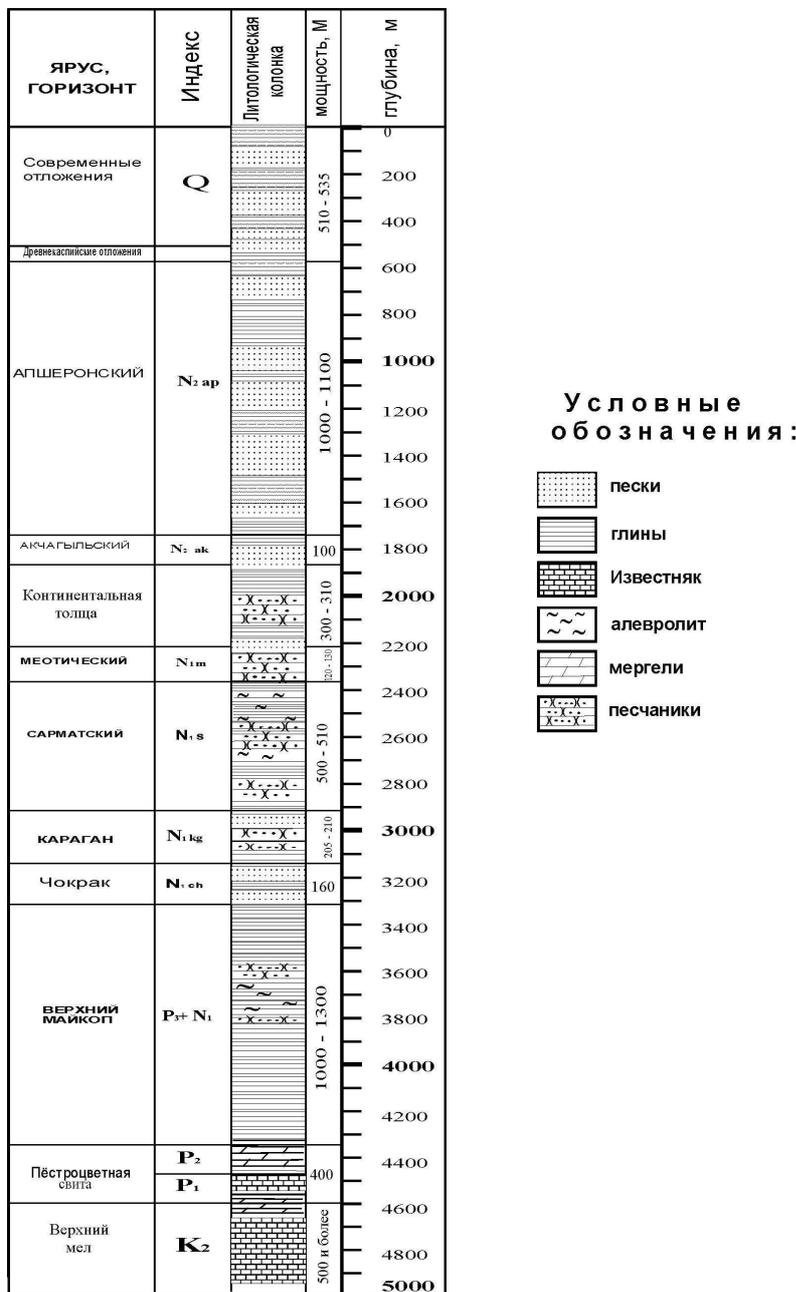


Рис 1. Литолого-стратиграфическая колонка Кизлярского месторождения.

## 2. Оценка потенциальной петротермальной и гидротермальной энергии осадочной толщи

Оценка энергии радиотеплогенерации в осадочной толще Кизлярского месторождения приведена в таблице 1.

Потенциальную петротермальную энергию сухой горной породы можно определить аналогично по следующей формуле:

$$Q_{с.п.} = G \cdot t \cdot V_n \cdot \rho; \quad (2.)$$

где  $Q_{с.п.}$  – потенциальная петротермальная энергия породы, [ $Q_{с.п.}$ ] = [Дж];

$C$  – теплоемкость породы, [ $C$ ] = [ $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$ ];

$V_n$  – объем породы, [ $V_n$ ] = [ $M^3$ ];

$\rho$  – плотность породы, [ $\rho$ ] = [ $кг/м^3$ ];

Объем породы определяется следующим образом:

$$V_n = \frac{100\% - K_n \%}{100\%} \cdot V; \quad (3.)$$

где  $V$  – полный объем, занимаемой породой вместе с порами; [ $V$ ] = [ $M^3$ ];

$K_n$  – коэффициент пористости в %.

$$V = a \cdot b \cdot h; \quad (4.)$$

где  $h$  – мощность пласта, [ $h$ ] = [м];

$a$  – ширина пласта: [ $a$ ] = [м],  $b$  – длина пласта, [ $b$ ] = [м];

Отдельно для каждого пласта по методу ПОРТ определяем петротермальную энергию. Значения «а» и «в» возьмем равными 5 км, что соответствует месторождению в пределах города Кизляр.

Оценка величины потенциальной петротермальной энергии в осадочной толще Кизлярского месторождения приведены в табл. 2, а литологическое строение на рис. 1.

Так как, в осадочной толще мы имеем дело с водонасыщенными породами, то мы должны определить и гидротермальную энергию пластовых вод. Пористость горных пород по различным слоям приведена в табл. 2. Потенциальную гидротермальную энергию пластовых вод мы можем определить по формуле:

$$Q_{п.в.} = C_v \cdot t \cdot V_{пор} \cdot \rho, \quad (5.)$$

где  $C_v$  – теплоемкость воды, [ $C_v$ ] = [ $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$ ];

$t$  – средняя температура пластовой воды, [ $t$ ] = [ $^\circ C$ ];

$V_{пор}$  – объем пор, [ $V_{пор}$ ] = [ $M^3$ ],  $\rho$  – плотность воды, [ $\rho$ ] = [ $кг/м^3$ ].

$$V_{пор} = \frac{K_n}{100\%} \cdot V, \quad (6.)$$

где  $V$  – полный объем, [ $V$ ] = [ $M^3$ ].

Оценка величины гидротермальной энергии пластовых вод приведена в табл. 2.

Полную потенциальную петротермальную энергию сухих пород можно определить при помощи выражения:

$$Q_{полн.с.п.} = \sum_i^n Q_{iс.п.}, \quad (7.)$$

где  $Q_{полн.с.п.}$  – полная потенциальная петротермальная энергия сухих пород [ $Q_{полн.с.п.}$ ] = [Дж];

$n$  – количество пластов;  $i$  – номер пласта.

$Q_{с.п.}$  – потенциальная петротермальная энергия сухих пород  $i$ -того пласта.

Полная петротермальная энергия исследованной осадочной толщи месторождения составляет:

$$Q_{полн.с.п.} = 2604,70 \cdot 10^{16} \text{ Дж.}$$

Полная потенциальная гидротермальная энергия пластовых вод будет равняться:

$$Q_{полн.п.в.} = \sum_i^n Q_{iп.в.} \quad (8.)$$

Теплоемкость воды принята 4.19 дж/г град, плотность – 1 г/см<sup>3</sup> или 10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>, средняя температура пластовой воды принята равной средней температуре водоносных пластов. Гидротермальная потенциальная энергия пластовых вод составляет:

$$Q_{полн.п.в.} = 679,34 \cdot 10^{16} \text{ Дж.}$$

Таблица 2

Оценка величины потенциальной петротермальной и гидротермальной энергии осадочной толщи Кизлярского месторождения

Возраст отложений	Глубина залегания, Н, м	Литологический состав	Мощность пород, h, м	Плотность пород, $\rho$ кг/м <sup>3</sup> $\times 10^3$	Средняя температура пласта °С	Коефф. пористости Кп, %	Теплоемкость породы Дж/(кг °С) $n \cdot 10^3$	Потенц. петротермальная энергия пород, $Q_{с.п.}$ $n \cdot 10^{16}$ Дж	Потенц. гидротермальная энергия пластовых вод, $Q_{п.в.}$ $n \cdot 10^{16}$ Дж
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q <sub>IV</sub>	80	Глины	80	2.4	18	6.6	1.26	10.17	1.00
	150	Пески	70	2.0	19	21.3	1.45	8.67	2.93
	280	Глины	130	2.48	23	6.4	1.26	21.76	2.01
	380	Пески	100	2.0	27	20.4	1.45	15.58	5.77
	430	Глины	50	2.48	30	6.5	1.25	10.87	1.02
	550	Пески	120	2.0	34	23	1.40	21.99	9.83
Q <sub>III</sub>	630	Глины	80	2.49	37	6.4	1.22	21.04	1.98
N <sub>2</sub> ap	730	Пески	100	2.0	40	25	1.26	18.90	10.48
	930	Глины	200	2.50	50	6.3	1.19	69.69	6.60
	1020	Пески	90	2.0	54	24	1.26	23.27	12.21
	1080	Глины	60	2.50	60	6.2	1.15	24.27	2.34
	1200	Пески	120	2.0	66	20.5	1.26	39.67	17.01
	1300	Глины	100	2.50	68	6.0	1.11	44.35	4.27
	1490	Пески	190	2.0	68	21	1.23	65.28	28.42
	1600	Глины	100	2.50	72	6.1	1.09	46.06	4.60
N <sub>2</sub> ak	1660	Пески	60	2.0	75	23	1.21	20.96	10.84
	1800	Глины	140	2.50	80	5.9	1.11	73.12	6.92
Контин. толща	1900	Пески	100	2.0	87	22	1.22	41.40	20.05
	2000	Глины	100	2.50	94	5.8	1.08	59.77	5.71
N <sub>2</sub> p	2130	Песчаники	130	2.02	95	19.5	1.23	61.75	25.23
	2180	Глины	50	2.50	97	5.9	1.05	29.95	3.00
N <sub>1</sub> m	2250	Пески	70	2.0	100	21	1.10	30.42	15.40
	2370	Песчаники	120	2.02	105	18.8	1.23	63.55	24.81
N <sub>1</sub> s	2530	Глины, алевродиты	160	2.07	110	5.5	0.91	78.32	10.14
	2650	Песчаники	120	2.02	116	19.5	1.20	67.91	28.43
	2800	Глины, алевродиты	150	2.07	120	5.8	0.89	78.10	10.94
	2870	Песчаники	70	2.02	124	18.5	0.95	33.94	16.82
N <sub>1</sub> kg	2920	Глины	50	2.50	128	5.7	0.92	36.47	3.82
	3000	Пески	80	2.0	130	21.3	0.94	38.47	23.20
	3080	Песчаники	80	2.02	136	21.5	0.95	40.98	24.50
N <sub>1</sub> ch	3150	Глины	70	2.54	143	5.9	0.93	55.63	6.19
	3220	Пески	70	2.02	148	22	0.94	38.36	23.88
	3250	Глины	30	2.54	150	5.8	0.93	25.03	2.73
	3310	Пески	60	2.02	155	21	0.93	34.51	20.46
P <sub>3</sub> + N <sub>1</sub>	3580	Глины	270	2.54	159	6.1	0.91	232.94	27.43
	3630	Песчаники	50	2.02	165	19.7	0.92	30.78	17.03
	3800	Глины, алевродиты	170	2.07	170	6.0	0.90	126.53	18.16
	3830	Песчаники	30	2.02	175	19.0	0.91	19.54	10.45
	4350	Глины	20	2.54	180	6.3	0.90	19.28	2.38
P <sub>1</sub>	4480	Мергели	130	2.40	188	12	1.01	130.33	30.72
P <sub>2</sub>	4550	Известняки	70	2.46	196	15	1.0	71.72	21.56
K <sub>2</sub>	4660	Мергели	110	2.40	200	12	1.02	118.48	27.65
	5000	Известняки	450	2.46	205	13.6	1.03	504.89	131.42
ИТОГО:								2604.70	679.34

Суммарная полная потенциальная геотермальная энергия сухих пород и пластовых вод будет равняться по данным табл. 2

$$Q_{полн.} = Q_{полн.с.п.} + Q_{полн.п.в.} \quad (9).$$

$$Q_{полн.} = 10^{16} (2604,70 + 679,34) = 3284,04 \cdot 10^{16} \text{ Дж}$$

или

$Q_{полн.} = 1119,72 \cdot 10^6$  ТУТ (тонн условного топлива), при условии, что 1 кг условного топлива эквивалентно 7000 ккал/кг.

Эта цифра соответствует огромной энергии, но следует отметить, что эта величина потенциальной суммарной геотермической энергии заключена в осадочной толще объемом  $125 \text{ км}^3$  – «геотермальном котле». А извлекаемые или возобновляемые величины этой энергии будут на порядки раз меньше этой теоретической величины.

Основными источниками внутренней тепловой энергии Земли как показывают многие исследователи [12, 6] и др. являются естественные радиоактивные элементы (уран, торий, калий) и полученные нами расчетные данные не противоречат этому положению.

#### Заключение

Сравнительный анализ энергии радиотеплогенерации и потенциальной петротермальной энергии осадочной толщи показывает, что в рассмотренном нами объеме осадочных горных пород Кизлярского месторождения площадью  $25 \text{ км}^2$  и мощностью 5 км величина потенциальной петротермальной энергии получилась равной  $2604,70 \cdot 10^{16}$  Дж, доля радиотеплогенерации по мощности составляет  $144,825 \cdot 10^3$  Вт, что в течение суток составит  $12,512 \cdot 10^6$  Дж, а за год -  $456,720 \cdot 10^7$  Дж, эта величина эквивалентна  $1,557 \cdot 10^3$  (ТУТ). Следует отметить, что радиотеплогенерация учтена только в осадочной толще до глубины 5 км, без учета более глубоких слоев осадочной толщи и консолидированных слоев земной коры (гранитная и базальтовая).

Потенциальная гидротермальная энергия, заключенная в данном объеме пород эквивалентна  $679,34 \cdot 10^{16}$  Дж, что эквивалентно 231,62 тоннам условного топлива (ТУТ), а суммарная петротермальная и гидротермальная энергия эквивалентна  $(888,10 + 231,62) \cdot 10^6$  ТУТ =  $1119,72 \cdot 10^6$  (ТУТ).

А энергия, излучаемая с данной расчетной поверхности за счет наблюдаемого на поверхности теплового потока (q), эквивалентна  $13,61 \cdot 10^{10}$  Дж/сут или  $49,67 \cdot 10^{12}$  Дж/год. Это эквивалентно соответственно 4,64 и 1693,6 (ТУТ).

Потенциальная геотермальная энергия осадочной толщи практически неисчерпаемый источник возобновляемой энергии, что определяют периоды полураспада основных элементов радиотеплогенерации урана, тория и калия соответственно  $4,5 \cdot 10^9$  лет,  $1,4 \cdot 10^9$  лет и  $1,3 \cdot 10^9$  лет. Результаты исследований показывают перспективность освоения и использования геотермальной энергии Земли в народном хозяйстве при наличии современных экологически чистых и экономически обоснованных технологий ее освоения.

#### Литература

1. В.А. Мейер, П.А. Ваганов. Основы ядерной геофизики. Ленинград. Изд-во ЛГУ. 1978. 360 с.
2. М.И. Пруткина, В.Л. Шашкин. Справочник по радиометрической разведке и радиометрическому анализу. М., 1975. 247 с.
3. А.А. Курбанов. Закономерности изменения теплофизических свойств флюидосодержащих коллекторов в пластовых РТ-условиях и способы их применения. Махачкала. Изд-во ДНЦ РАН. 2000. 226 с.
4. Д.А. Мирзоев, Ф.Г. Шарафутдинов. Геология месторождений нефти и газа Дагестана. Махачкала. Дагкнигоиздат. 1986. 317 с.
5. Проблемы геотермальной энергетики Дагестана. Под ред. Х.И. Амирханова и С.Н. Ятрова. М., Недра, 1980. 208 с.
6. И.Ф. Вовк. Радиолит подземных вод и его геохимическая роль. М., Недра, 1979. 231 с.
7. Х.И. Амирханов, В.В. Суетнов, Х.А. Гаирбеков. Геотермические исследования в Дагестане и вопросы практического использования тепла земли. Махачкала. Изд-во ДНЦ РАН. 1970. 140 с.
8. Х.И. Амирханов, Л.И. Ровнин, В.В. Суетнов и др. Опыт применения нефтегазовой терморазведки. Махачкала, изд. Даг. Фил. АН СССР, 1975. 223 с.
9. И.О. Гаргацев, А.С. Батырмурзаев, О.А. Маммаев. Оценка радиотеплогенерации в осадочной толще восточного Предкавказья (Дагестан). Доклады АН. Т. 346. № 3. 1996. С. 396–398.
10. Х. Уонг. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Москва, Атомиздат. 1979. 216 с.
11. Е.А. Любимова. Термика Земли и Луны. М., Наука, 1968. 280 с.
12. Н.С. Боганик. Радиогенное тепло земной коры Русской платформы и ее складчатого обрамления. М., Наука, 1975. 160 с.