

## ТЕПЛОВОЙ ПОТОК ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

**Аннотация.** В статье рассматриваются энергетические аспекты современных геодинамических процессов на примере изучения глубинного теплового потока территории Северного Тянь-Шаня. Приведена краткая характеристика геологического строения литосферы региона. Обобщены и систематизированы данные о параметрах теплового потока земной коры. В их число вошли определения, которые были получены по измерениям теплопроводности пород и градиента температуры в восстановившихся скважинах. Привлечены также данные Мирового центра данных и экспериментальный материал о геотермических свойствах пород из открытых источников. Приводится карта теплового потока территории. Анализируются особенности локального теплового потока в сравнении с среднемировыми данными для континентальных тектонически активных районов. Установлены аналитические зависимости между теплогенерацией пород за счет распада радиоактивных элементов и скоростью упругих волн для земной коры Северного Тянь-Шаня. Обсуждаются закономерности формирования теплогенерирующих элементов с глубиной. Приводятся и обсуждаются модели распределения мантийного и радиогенного теплового потока в объеме земной коры. Выполнен сравнительный анализ с проявлениями сейсмической активности территории. Дается заключение о преобладающем влиянии температурных условий на формирование сейсмического режима.

**Ключевые слова:** геотермия, тепловой поток, радиогенная теплогенерация, земная кора, литосфера, мантийный тепловой поток, сейсмичность.

### Введение

Планета Земля в классификации термодинамических систем может быть отнесена к классу открытых многофазных гетерогенных систем. Это означает, что как природный объект Земля находится вне состояния термодинамического равновесия, что обмен энергией с окружающей средой носит характер необратимого процесса и характеризуется потоком негэнтропии, обеспечивающей организацию геофизических структур. Это обстоятельство ставит геологию и ее раздел – геодинамику в разряд физических наук, изучающих современные проявления эволюции.

Энергетические аспекты современных геодинамических процессов используются для изучения глубинного строения литосферы и механизмов разрушения геологической среды под влиянием температуры и давления [1-5]. Литосфера представляет собой твердую внешнюю оболочку планеты. Она включает в себя земную кору и верхнюю мантию, граница которых условно проходит по слою Мохоровичича. Твердая земная кора расположена над верхней мантией и состоит из двух основных компонентов: океа-

нической и континентальной, причем последняя является более плотной и мощной. Температурное поле в большой степени определяет физическое состояние материала литосферы Земли.

Внутренняя энергия нашей планеты имеет два основных источника: первый – сумма потенциальной энергии, полученной в процессе аккреции Земли [6] и энергии, добавленной астероидно-метеоритными ударами во время начального роста, и, второй – энергия, выделяемая радиоактивным распадом элементов, таких как  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  вследствие реакций радиоактивного распада.

Оба типа энергии, аккреции и радиогенная, со временем убывают и пропорциональны физическим параметрам планеты. Количество генерируемой энергии пропорционально планетарному объему, а количество рассеиваемой энергии зависит от площади поверхности планеты. Поэтому для охлаждения требуется определенное время. Внутренняя энергия рассеивается постепенно к внешним слоям, вызывая процессы, которые формируют структуру земной коры [7]. По оценкам полная мощность энергии, рассеиваемой внутри Земли, составляет

30÷44 ТВт (~56 мВт\*м<sup>-2</sup>) [8]. Эти величины малы по сравнению с 174 РВт (~340 Вт\*м<sup>-2</sup>), полученными от Солнца в верхней части атмосферы.

Изучение температурного режима земных недр, как прямого индикатора энергетического состояния литосферы, необходимо для понимания причин современных геодинамических процессов и прогнозирования дальнейшего их развития во времени, что особенно актуально для районов, где происходят интенсивные тектонические движения, сопровождаемые сильными и катастрофическими землетрясениями. Именно к таким районам относится Северный Тянь-Шань. Об этом свидетельствуют происшедшие здесь землетрясения: Верненское (1887г.), Чиликское (1889г.), Кеминское (1910г.), Жаланашское (1978г.), Байсорунское (1990г.) и др. Практическое значение геотермических исследований обусловлено необходимостью разработки надежных методов прогноза землетрясений и сейсмического районирования.

К настоящему времени температурное состояние земных недр Северного Тянь-Шаня изучено недостаточно в связи с необходимостью использования дорогостоящего бурения. В качестве метода исследований в работе применено математическое моделирование с привлечением имеющихся экспериментальных данных и существующих научных представлений о физическом строении изучаемой территории.

Цель работы заключалась в изучении распределения глубинного теплового потока земной коры Северного Тянь-Шаня в связи оценкой сейсмической активности территории.

### **Элементы строения литосферы Северного Тянь-Шаня**

Геологические, геофизические и сейсмологические особенности строения земной коры Северного Тянь-Шаня обобщены и систематизированы в монографиях [9-13 и др.].

В геологическом отношении регион входит в альпийский неотектонический пояс. Он включает вытянутые в широтном направлении горные хребты Кунгей и Заилийский Ала-Тау на юге, Илийскую меж-

горную впадину и плато Карой в центральной части, Южно-Прибалхашскую и Саркандскую впадины на севере. С востока район ограничен отрогами горных хребтов Жетысуйского Ала-Тау, с запада - восточным окончанием Чу-Илийских гор.

Геофизическими исследованиями земная кора в общем виде разделяется на осадочный, гранитный (верхний и нижний) и базальтовый слои. Мощность земной коры изменяется от 42 км до 55÷57 км, увеличиваясь в юго-восточном направлении под горные сооружения Тянь-Шаня и Джунгарии. Наименьшая мощность коры в альпийских впадинах, наибольшая – под горными хребтами.

Осадочный слой представлен породами мезокайнозоя – глинами, суглинками, песками, песчаниками, алевролитами, галечниками. Верхний подслон гранито-гнейсового слоя слагают породы терригенно-вулканогенного комплекса палеозоя: эффузивы, слабо метаморфизованные осадочные породы (сланцы, песчаники, известняки), интрузивные гранитоидные комплексы. Нижний подслон образован породами докембрия. Это – гнейсы, кристаллические сланцы, граниты, пироксениты, амфиболиты, эклогиты. В составе базальтового слоя присутствуют габбро, габбро-диабазы, гранатовые амфиболиты, гранулиты, серпентинизированные сланцевые породы.

Структурно-тектоническая модель верхней части земной коры представлена системой крупных неоднородностей – блоков и переходных зон, возникших на ранних стадиях геологического развития и затем усложнявшихся. Границами блоков служат тектонические разломы различной глубинности.

В сейсмическом отношении территория Юго-Восточного Казахстана относится к одной из наиболее активных областей Средней Азии [10,14,15]. По степени концентрации эпицентров землетрясений выделены Северо-Тянь-Шаньская и Джунгарская эпицентральные области субширотного простирания. Большая часть землетрясений тяготеет к хребтам Заилийскому, Кунгейскому и Жетысуйскому Ала-Тау. Основная часть гипоцентров расположена на глубинах 10÷20 км. Области с глубинами очагов более 20 км

приурочены к восточной и центральной части Заилийского и Кунгей Ала-Тау. Нижняя часть коры, в которой имеется область пониженных скоростей сейсмических продольных волн, практически не содержит очагов землетрясений.

Исходной информативной базой глубинного строения земной коры послужили данные о скорости продольных волн по четырём субширотным и шести субмеридиональным геотраверсам в пределах координат N42°-N45° и E75°-E80° [10,16-18]. Слои земной коры характеризуются средними скоростями  $V_p$ : осадочный 4.0÷5.6 км/с, верхняя часть гранитного слоя – 5.8-6.2 км/с, нижняя часть – 6.4÷6.6 км/с, базальтовый – 6.8÷7.4 км/с и верхняя мантия – более 8.0 км/с. Отмечается высокий градиент скорости  $V_p$  в верхней части коры, что приводит к резкому изменению скорости на границе осадочного чехла и фундамента.

#### Тепловой поток, измеряемый на поверхности Земли

Тепловой поток (плотность теплового потока) определяет интенсивность теплоотдачи глубинной энергии земных недр через единицу поверхности. Расчетная формула для вычисления теплового потока, предложенная Фурье:

$$Q = -\lambda \cdot G = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (1)$$

где  $Q$  – тепловой поток (Вт/м<sup>2</sup>),  $G$  – геотермический градиент (К/м),  $T$  – измеренная температура на разных глубинах,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности пород в интервале этих глубин (Вт/м·К). Знак минус означает направленность процесса передачи тепла от высокой температуры к более низкой. В осадочных толщах из-за частой смены литологического состава наблюдаются вариации градиента на различных глубинах. В этом случае градиент определяется методом наименьших квадратов [19]:

$$G = \frac{n \cdot \sum_1^n H_i T_i - \sum_1^n H_i \cdot \sum_1^n T_i}{n \cdot \sum_1^n (H_i)^2 - \sum_1^n H_i \cdot \sum_1^n H_i} \quad (2)$$

где  $n$  – количество интервалов определения температуры  $T_i$  на глубине  $H_i$ .

Коэффициент теплопроводности – теплофизический параметр, обуславливающий скорость передачи тепла и степень прогрева пород, определяется по результатам лабораторных измерений при нормальных термо-

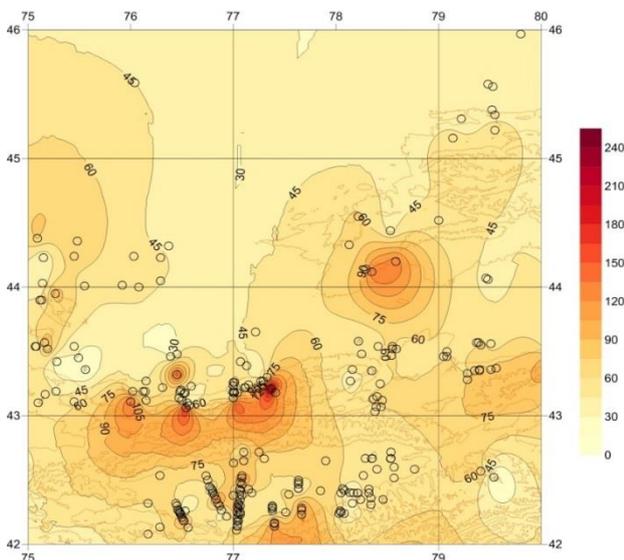
барических условиях ( $T=20^\circ \text{C}$ ,  $P=1 \text{ атм.}$ ). Средние значения коэффициента теплопроводности на образцах, отобранных из керна глубоких скважин и обнажений горных хребтов Северного Тянь-Шаня, составляют: осадочный слой – 2.04, гранитный слой – 2.61, базальтовый слой – 3.2 Вт/м·К [19,20]. Средневзвешенная теплопроводность пород сейсмогенного слоя (осадочный + гранитный) составляет 2.42 Вт/м·К.

В настоящее время по формулам (1,2) рассчитаны величины теплового потока (ТП) для всей Земли по равноценным площадкам осреднения географической сетки размером  $2^\circ \times 2^\circ$  [21-23]. Средняя величина теплового потока на земном шаре достигает 81 мВт/м<sup>2</sup>. Тепловой поток через океаны и континенты составляет в среднем 95 и 60 мВт/м<sup>2</sup> соответственно. Распределение выноса глубинного тепла связывается с особенностями строения и геологического развития основных структур коры. Максимальные теплопотери наблюдаются на тектонически активных участках, минимальные – в районах тектонической стабилизации. Средне-Азиатский пояс (4679 определений) характеризуется высокими значениями теплового потока 70÷90 мВт/м<sup>2</sup>.

Всего в пределах изучаемой территории ограниченной координатами N40°-50°E70°-90° проанализировано 485 определений теплового потока, из них 169 наблюдений выполнено на территории Юго-Восточного Казахстана и 70 на прилегающих районах Кыргызстана. Наибольшее количество пунктов измерений сосредоточено в пределах межгорных впадин. Горные районы Северного Тянь-Шаня и пустынные области Южного Прибалхашья изучены слабо в связи с отсутствием глубоких скважин. Большинство геотермических исследований выполнено в скважинах со средней глубиной 300-400 метров, в межгорных Алма-Атинской и Илийской впадинах глубина отдельных скважин превышает 3 км. Средняя плотность пунктов определений теплового потока составляет 1 измерение на 18 км<sup>2</sup>. Составлена схема теплового потока (рисунок 1).

В пределах описываемого региона выделены три области с различным геотермическим режимом: – высокогорные районы,

платформенная часть и современные межгорные впадины. Высокогорные районы Северного Тянь-Шаня и Жетысуйского Алатау характеризуются повышенным уровнем теплового потока от 54 мВт/м<sup>2</sup> до 266 мВт/м<sup>2</sup> при среднем значении 63 мВт/м<sup>2</sup>. Плотность теплового потока в межгорных впадинах меняется от 31 мВт/м<sup>2</sup> до 119 мВт/м<sup>2</sup> при среднем значении 54 мВт/м<sup>2</sup>. Тепловой поток платформенной части территории (Балхашский блок) составляет 40÷45 мВт/м<sup>2</sup>. Среднее значение теплового потока на поверхности консолидированной коры Тянь-Шаня равно 77 мВт/м<sup>2</sup> [24], что близко к среднемировым значениям (73 мВт/м<sup>2</sup>) для кайнозойских тектонически активных районов.

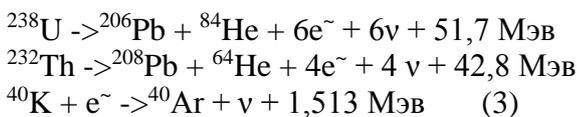


○ – пункты наземных определений в скважинах

Рисунок 1 – Тепловой поток Северного Тянь-Шаня (мВт/м<sup>2</sup>).

### Радиоактивная генерация тепла

В формировании теплового потока значительную роль играет радиоактивный распад химических элементов <sup>40</sup>K, <sup>238</sup>U и <sup>232</sup>Th и прохождение α, β и γ излучения при распаде через вещество горных пород:



где ν – антинейтрино.

Вклад радиоактивного тепла в энергетический баланс Земли неоднократно рассматривался в работах [25-27 и др.]. Установлена

концентрация радиоактивных элементов в осадочном и гранитно-метаморфическом слоях литосферы и убывание ее с глубиной по экспоненциальному закону. Это обусловлено направленной миграцией урана, тория и калия в ходе дифференциации вещества земных недр процессе становления Земли.

Магматические породы Северного Тянь-Шаня классифицируются как ураноториеносные и существенно ураноносные. Отмечается максимальная повышенная концентрация радиоактивных элементов в магматических породах кислого состава и повышенная величина торий-уранового отношения. Содержание радиоактивных элементов в магматических породах основного состава незначительно превышает среднее (Таблица 1 в приложении 1).

Выполнен анализ более 1000 определений концентрации радиоактивных элементов в образцах горных пород для различных областей Тянь-Шаня и Памира [28]. Минимальным тепловыделением, около 0.5 мкВт/м<sup>3</sup>, характеризуются карбонатные породы. Максимальное тепловыделение (до 3.5 мкВт/м<sup>3</sup>) имеют интрузивные и вулканогенные магматические образования кислого состава. Теплогенерация верхней части гранитного слоя оценивается в 2.3 мкВт/м<sup>3</sup>, а нижней части (или диоритового слоя) архейско-протерозойского фундамента – 1.8 мкВт/м<sup>3</sup>. Тепловыделение базальтового слоя меняется от 0.2 мкВт/м<sup>3</sup> до 0.6 мкВт/м<sup>3</sup> (Таблица 2в приложении 1).

Для вычисления радиоактивного теплового потока необходимо знать распределение состава горных пород с глубиной. Прямые определения концентраций <sup>40</sup>K, <sup>238</sup>U и <sup>232</sup>Th не возможны для глубинных слоев земной коры и литосферы, поэтому применяются косвенные оценки радиоактивной теплогенерации по изменениям плотности пород и скорости сейсмических волн по данным сейсмонаблюдений.

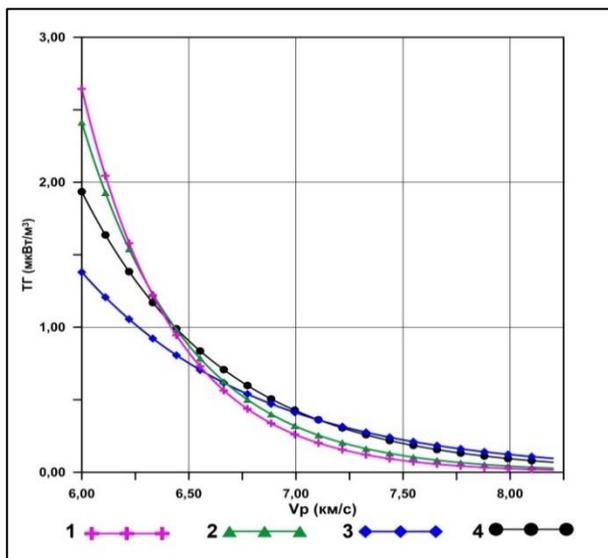
В настоящее время для комплекса основных и изверженных пород найден ряд эмпирических соотношений и корреляционных зависимостей распределения теплогенерации в коре с позиции ее связи с сейсмическими скоростями [31-32].

Установлены зависимости между теплогенерацией (А, мкВт/м<sup>3</sup>) и скоростью

упругих волн ( $V_p$ , км/с) для земной коры Северного Тянь-Шаня [33]:

$$A = 0.3125 \cdot (10^{-5}) \cdot \exp(1.61 \cdot V_p) \quad (4)$$

Графики удовлетворительно согласуются в интервале скоростей более 6.4 км/с. Значения для гранитного слоя консолидированной земной коры несущественно различаются между собой для скоростей равных  $\approx 6.0$  км/с. (Рисунок 2)



1 – [32], 2 – [25], 3 – [31], 4 – формула (4) [33]

Рисунок 2 – Зависимость интенсивности радиогенного тепловыделения в породах земной коры от скорости упругих волн:

Сопоставление оценок теплогенерации разных слоев земной коры по рассмотренным выше данным и принятой зависимости (4) показывает удовлетворительную сходимость модели радиогенной теплогенерации горных пород Северного Тянь-Шаня с фактическим материалом глубинного бурения.

Магматические образования, развитые в Северо-Тянь-Шаньском и Джунгарском блоках, характеризуются более высоким уровнем теплогенерации. Наибольшая концентрация радиоактивных элементов наблюдается в верхней части гранитного слоя на глубинах от 5 км до 30 км.

Теплогенерация этого слоя составляет от 1.0 до 2.0 мкВт/м³. Осадочный слой, мощностью до 5 км, имеет теплогенерацию от 0.2 мкВт/м³ до 1.0 мкВт/м³. С глубиной радиоактивное тепловыделение уменьшается неравномерно.

Нижняя часть гранитного слоя в Северо-Тянь-Шаньском блоке и Алма-Атинской впадине характеризуется интенсивностью 0.6÷1.1 мкВт/м³, в Балхашском блоке – 0.5÷1.0 мкВт/м³. Теплогенерация базальтового слоя, равная 0.5 мкВт/м³, в различных геоблоках одинакова (Рисунок 3 в приложении 2).

### Фоновый (мантийный) тепловой поток

Используя данные о распределении радиоактивных элементов в земной коре и данные регистрируемого на поверхности теплового потока, определено поступление тепла из верхней мантии. Структура фонового теплового потока получена путем разложения наблюдаемой на поверхности величины на коровую (радиогенную) и мантийную (глубинную).

Для территории Северного Тянь-Шаня радиогенная составляющая рассчитана по формуле теплового эффекта суммы двумерных параллелепипедов с различной теплогенерацией [31]

$$Q = \frac{A_i}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ x \cdot \ln(x^2 + z^2) + 2 \cdot z \cdot \arctg \frac{x}{z} \right] \Big|_{x_1 z_1}^{x_2 z_2} \quad (5)$$

где  $Q$  – тепловой поток,  $A_i$  – теплогенерация бруса с координатами  $x_1, z_1 \rightarrow x_2, z_2$ . Разность измеренных значений и вычисленных по формуле (4) приходится на глубинную составляющую теплового потока, обусловленную притоком тепла из мантии и действием аномальных источников тепла (рисунок 4 в приложении 2). Вклад радиогенной компоненты плотности теплового потока в общий ТП достигает от 60% до 90%, что значительно выше среднемировых данных для континентальной литосферы.

### Заключение

Разность измеренных значений и радиогенной составляющей приходится на глубинную часть теплового потока, обусловленную притоком тепла из мантии. Характерная форма в виде расходящейся сверху воронки имеет значительное сходство с известными горячими плюмами или мантийными потоками вертикального течения

[37, 38]. Распределение теплового потока связано с особенностями структурно-тектонического строения и отражает тектонические процессы в регионе. Возрастание фонового теплового потока с севера на юг может быть связано с повышением температур в нижней части коры Северного Тянь-Шаня. Относительно разогретый материал, поднимающийся из верхней мантии, создает условия для частичного плавления вещества коры, что может интерпретироваться как энергетический источник проявлений сейсмической активности региона. Вертикальная составляющая горячих восходящих потоков из верхней мантии может рассматриваться как общий геофизический фактор, обуславливающий геоэлектрические, скоростные, магнитные и плотностные особенности строения земной коры и верхней мантии региона [39].

Особенностью распределения гипоцентров землетрясений является расположение последних в областях с пониженными значениями глубинного теплового потока или с областями минимального прогрева. Повышенная плотность эпицентров землетрясений среднего энергетического класса (9.0÷10.5) в охлажденных зонах, возможно, обусловлена пониженными вязкостными свойствами земной коры и повышенной хрупкостью. Однако наиболее сильные катастрофические землетрясения прошлого века (Верненское, Кеминское) произошли в областях максимального привноса мантийного тепла. Неоднозначность интерпретации результата состоит в неопределенности первоисточника высоких значений теплового потока в обсуждаемой области. Возможно наличие мантийного плюма в сочетании разогрева пород вследствие самих землетрясений и механического разрушения.

В целом, выполненные исследования не следует считать доказательством того, что неоднородности теплового потока однозначно являются единственной причиной происходящих в регионе землетрясений. Тем не менее, полученные данные позволяют сделать вывод о преобладающем влиянии температурных условий на развитие сейсмического процесса и дают дополнительную информацию для прогнозных заключений о

возможных механизмах и физических параметрах сейсмоактивной среды региона.

### Список литературы

- 1 Жантаев Ж.Ш., Мусабаев Т.А., Бибосинов А.Ж. Наземно-космические технологии изучения динамики земной коры и развитие методов прогноза землетрясений. – Алматы: Lambert Academic Publishing, 2013. – 348 с.
- 2 Курскеев А.К., Оспанов А.Б. и др. Прогнозирование землетрясений в Казахстане. – Алматы, 2000. – 320 с.
- 3 Jaupart C., Labrosse S., Mareschal J.C. Temperatures, heat and energy in the mantle of the Earth // in Treatise: on Geophysics/Mantle Convection; edited by D. Bercovici. – Amsterdam: Elsevier. – 2007. – Vol. 7. – P.253-303.
- 4 Vincenzo P., Massimo V., Paolo Ch. Geothermics. Heat Flow in the Lithosphere // University of Genova, Springer, – 2014. – 127 p.
- 5 Любимова Е.А., Любошиц В.М., Парфенюк О.И. Численные модели тепловых полей Земли. –М.: Наука, –1983. –126с.
- 6К.А. Постнов, А.В. ЗасовКурс общей астрофизики // Физический факультет МГУ.– 2005.– 192с.
- 7 Condie K.C. Supercontinents and superplume events: distinguishing signals in the geologic record. Phys. Earth Planet. In. 146.319-332. 2004
- 8 Pollack H.N., Hurter S.J., Johnson J. Heat flow from the Earth's interior, analysis of the global data set. Rev. Geophys. 31. 267-280, 1993
- 9 ГордиенкоВ.В., ЗуннуновФ.Х. и др. Тектоносфера Средней Азии и Южного Казахстана. – Киев, 1990. –232 с.
- 10 Тимуш А.В. Сейсмоструктура литосферы Казахстана – Алматы, 2011, 590 с.
- 11 Юдахин Ф.Н. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня. – Фрунзе: Илим, 1983. – 248 с.
- 12 Земная кора сейсмоактивных районов Казахстана – Алма-Ата: Наука, 1982, 231 с.
- 13 Курскеев А.К. Геофизическая характеристика земной коры Казахстана. - Алма-Ата: Наука, 1977. – 190с.
- 14 Сейсмическое районирование Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1979. –140 с.
- 15 Садыкова А.Б. Сейсмическая опасность территории Казахстана. –Алматы. 2012, –267 с.

- 16 Шацлов В.И. Геофизические критерии сейсмической активности тектоносферы Тянь-Шаня // В кн.: Проблемы предотвращения последствий разрушительных землетрясений. – Алматы: Эверо, 2002. – С.119-124.
- 17 Шацлов В.И., Сайипбекова А.В. Профильная томография литосферы Тянь-Шаня по материалам региональной сейсмологии // Доклады НАН РК. – 1994. – № 6. –С.47-52.
- 18 Шацлов В.И., Степаненко Н.П. Геофизические критерии выявления очаговых зон сильных землетрясений на Тянь-Шане // В кн.: Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных районов. – Москва-Бишкек, 2003. – С.129-139.
- 19 Любимова Е.А., Поляк Б.Г., Смирнов Я.Б. и др. Каталог данных по тепловому потоку на территории СССР – М.: Наука, 1973. – 64с.
20. Тектоносфера Средней Азии и Южного Казахстана / Гордиенко В.В., Зуннунов Ф.Х., Таль-Вирский Б.Б. и др. - Киев: Наукова думка, 1990. - 232 с.
- 21 Davies J.H. Global map of solid Earth surface heat flow// *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, –2013.–P.14, doi:10.1002/ggge.20271.
- 22 Gosnold W.D., Panda B. The Global Heat Flow Database of The International Heat Flow Commission. –2002. Available at <http://www.und.edu/org/ihfc/index2.html>.
- 23 Goutorbe, B., Poort J., Lucazeau F., Raillard S. Global heat flow trends resolved from multiple geological and geophysical proxies// *Geophysical Journal International* .–2011. –№ 187. P.1405-1419.
- 24 Курскеев А.К. Проблемы прогнозирования землетрясений. - Алма-Ата: Наука, 1990. –264с.
- 25 Смыслов А.А., Моисеенко У.И., Чадович Т.З. Тепловой режим и радиоактивность Земли. - Л.: Недра, –1979. –190с.
- 26 William Lowrie, *Fundamentals of Geophysics, Second Edition* // Published in the United States of America by Cambridge University Press, –New York. –2007. –393p.
- 27 Vincenzo P., Massimo V., Paolo Ch. *Geothermics. Heat Flow in the Lithosphere* // University of Genova, Springer, –2014. –127p
- 28 Аршавская Н.И. Тепловые потоки из мантии и глубинные температуры в некоторых структурах Средней Азии // В кн.: Геотермические исследования в Средней Азии и Казахстане. – М., 1985. – С166-179.
- 29 Шварцман Ю.Г. Тепловой режим литосферы и аномальное состояние верхней мантии Тянь-Шаня // В кн.: Геодинамика внутриконтинентальных областей. – Новосибирск: Наука, 1990. – С.273-281.
- 30 Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. – М.:Недра, 1976. – 527 с.
- 31 Гордиенко В.В., Завгородняя О.В., Якоби Н.М. Тепловой поток континентов. - Киев: Наукова думка, 1982. –184с.
- 32 Rybach L., Bantebarth G. Relationships between the petrophysical properties, density, seismic velocity, heat generation and mineral logical constitution. // *Earth and Planet Sciens letters*. –1982. –Vol. 57. –P.367-376.
- 33 Виляев А.В. Геотермическая модель земной коры Северного Тянь-Шаня: автореф. дис. канд. г-м.наук. – Новосибирск, 1992. – 18 с.
- 34 Cermak V. Lithospheric thermal regimes in Europe// *Physics of the Earth Planetary Interiors* -1993, Int. 79. –P. 179 –193.
- 35 Сыдыков Ж.С., Чакабаев С.Е., Мухаметжанов М.А. Гидрогеотермические условия Арало-Каспийского нефтегазоносного региона. - Алма-Ата: Наука, 1977. –183с.
- 36 Петрунин Г.И., Попов В.Г. Тепловые свойства пород из Кольской сверхглубокой скважины. // *Известия АН СССР. Физика Земли*. –1988. –№1. –С.44-52.
- 37 Montelli, R., G. Nolet, F. A. Dahlen, and G. Masters (2006), A catalogue of deep mantle plumes: New results from finite-frequency tomography, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7, Q11007, doi:10.1029/2006GC001248.
- 38 Jason D. Chaytor, Randall A. Keller, Robert A. Duncan, Robert P. Dziak Seamount morphology in the Bowie and Cobb hot spot trails, Gulf of Alaska First Published:29 September 2007. – Vol. 8, Article Number: Q09016DOI: 10.1029/2007GC001712.
- 39 Курскеев А.К. Геотермическая модель и современное корообразование в Тянь-Шаньском сегменте // В кн.: Результаты комплексных исследований в сейсмоактивных районах Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1984. – С.27-40.

**Принято к печати 15.03.2017**

Приложение 1

Таблица 1 – Среднее содержание радиоактивных элементов в породах Северного Тянь-Шаня

Породы	[28]			[29]			[30]		
	уран г/т	то- рий г/т	ка- лий г/т	уран, г/т	торий, г/т	калий, %	уран, г/т	торий, г/т	ка- лий г/т
KZ	1.9	16.0	2.9	3.6	13.3	1.55	2.8	8.9	1.5
MZ-PZ	2.8	12.0	2.6	14.7	13.6				
PZ магматические породы									
кислые	5.2	28.2	3.45	16.1	51.6	3.66	4.2	16	3.4
средние	2.5	13.5	1.7	9.4	30.0	4.33	2.1	7.3	2.5
основные	1.5	1.6	0.6	1.7	5.7	0.7	0.8	2.5	0.6

Таблица 2 – Теплогенерация пород земной коры Северного Тянь-Шаня (мкВт/м<sup>3</sup>)

осадочный слой	гранитный слой		базальтовый слой	верхняя мантия	источник
	верхний	нижний			
0.93-1.60	2.1-2.3	1.1-1.8	0.4-0.6	0.20	[34]
0.93-1.33	2.0-2.4	0.7-1.2	0.45	0.013	[35]
1.03	2.0	0.96	0.53		[24]
1.20	2.2	1.1	0.35		[36]
0.5-1.0	1.4-2.0	0.5-1.25	0.3-0.5	<0.10	[33]

Приложение 2

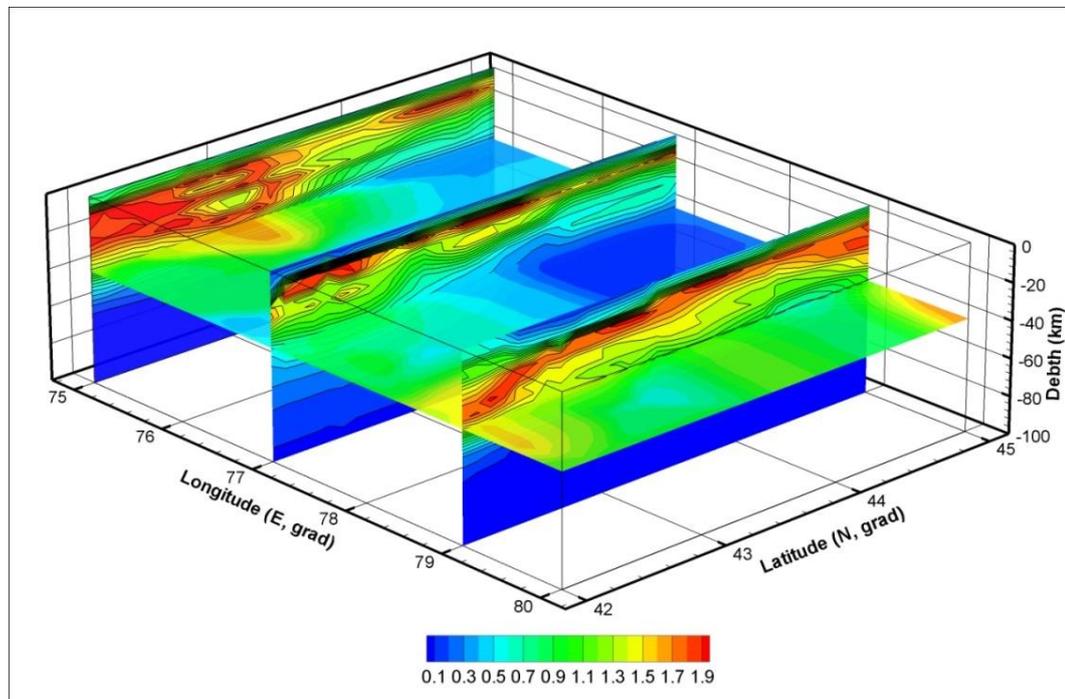


Рисунок 3 – Распределение радиогенной теплогенерации пород земной коры по меридианам E75<sup>0</sup>, E77<sup>0</sup>, E79<sup>0</sup> и в разрезе на глубине 40 км (мкВт/м<sup>3</sup>)

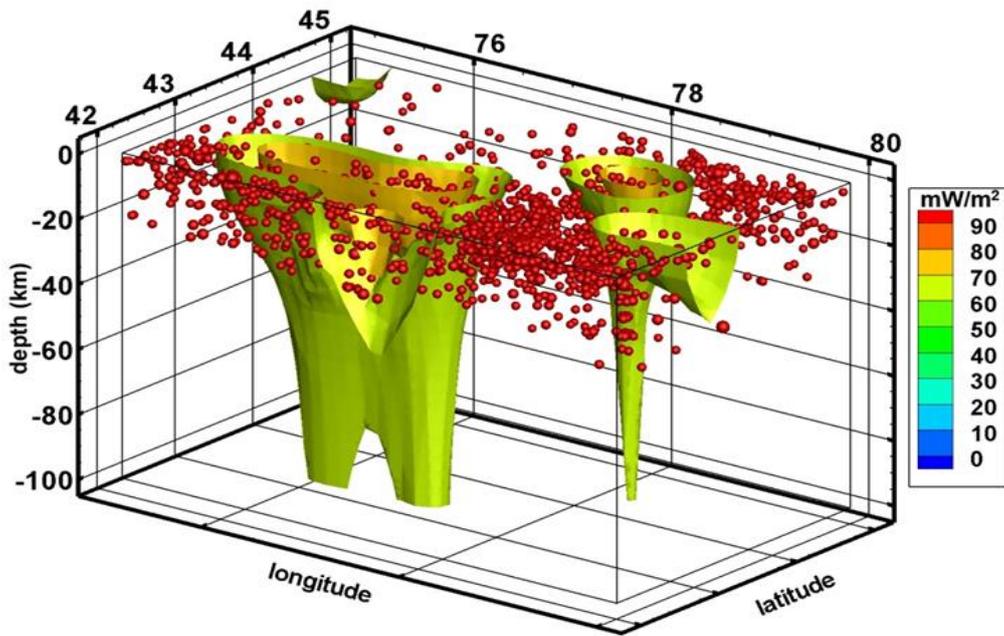


Рисунок 4 – Модель теплового потока Северного Тянь-Шаня с гипоцентрами землетрясений

**Жантаев Ж.Ш., Виляев А.В.**

Национальный центр космических исследований и технологий  
ДТОО Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан

## ТЕПЛОВОЙ ПОТОК ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

**Аннотация.** В статье рассматриваются энергетические аспекты современных геодинамических процессов на примере изучения глубинного теплового потока территории Северного Тянь-Шаня. Приведена краткая характеристика геологического строения литосферы региона. Обобщены и систематизированы данные о параметрах теплового потока земной коры. В их число вошли определения, которые были получены по измерениям теплопроводности пород и градиента температуры в восстановившихся скважинах. Привлечены также данные Мирового центра данных и экспериментальный материал о геотермических свойствах пород из открытых источников. Приводится карта теплового потока территории. Анализируются особенности локального теплового потока в сравнении с среднемировыми данными для континентальных тектонически активных районов. Установлены аналитические зависимости между теплогенерацией пород за счет распада радиоактивных элементов и скоростью упругих волн для земной коры Северного Тянь-Шаня. Обсуждаются закономерности формирования теплогенерирующих элементов с глубиной. Приводятся и обсуждаются модели распределения мантийного и радиогенного теплового потока в объеме земной коры. Выполнен сравнительный анализ с проявлениями сейсмической активности территории. Дается заключение о преобладающем влиянии температурных условий на формирование сейсмического режима.

**Ключевые слова:** геотермия, тепловой поток, радиогенная теплогенерация, земная кора, литосфера, мантийный тепловой поток, сейсмичность.

**Zhantaev Zh.Sh., Vilyaev A.V.**

National Center of Space Research and Technology  
Institute of Ionosphere, 050020, Kamenskoe Plateau, Almaty, Kazakhstan  
vilayev@gmail.com

## **HEAT FLOW OF THE EARTH'S CRUST OF THE NORTHERN TIEN SHAN**

**Abstract:** The energy aspects of modern geodynamic processes are considered in the article on the basis of the study of the deep thermal heat flow of the Northern Tien Shan. A brief description of the geological structure of the lithosphere of the region is given. Data on the parameters of the heat flow of the earth's crust are generalized and systematized. These included definitions that were obtained by measuring the thermal conductivity of rocks and the temperature gradient in the recovered boreholes. Data from the World Data Center and experimental material on the geothermal properties of rocks from open publications are also included. The heat flow map of the territory is given. The features of the local heat flow in comparison with the world average data for continental tectonically active regions are analyzed. Analytical relationships between the heat generation of rocks due to the decay of radioactive elements and the propagation velocity of the crustal waves of the Northern Tien Shan are established. The regularities of the formation of heat-generating elements with depth are discussed. Models of distribution of mantle and radiogenic heat flow in the volume of the earth's crust are presented and discussed. A comparative analysis with manifestations of seismic activity of the territory was carried out. An opinion is given on how to influence the formation of the seismic regime.

**Keywords:** geothermy, heat flow, radiogenic heat generation, earth crust, lithosphere, mantle heat flow, seismicity.

**Жантаев Ж.Ш. Виляев А.В.**

«Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы» АҚ «Ионосфера институты» ЕЖШС, 050020, Каменское плато, Алматы қ. Қазақстан  
Vilayev@gmail.com

## **СОЛТҮСТІК ТЯНЬ – ШАНЬ ЖЕР ҚЫРТЫСЫНЫҢ ЖЫЛУЛЫҚ ӨРІСІ**

**Аннотация.** Мақалада Солтүстік Тянь-Шань аймағының жылулық өрісін тереңдік арқылы зерттеуінің негізіндегі қазіргі заманғы геодинамикалық үдерістердің энергетикалық аспектері қарастырылған. Аймақтың литосферасының геологиялық құрылысының қысқаша сипаттамасы көрсетілген. Жер қыртысының жылулық өрісі параметрлерінің мәліметтері жүйелендірілген және жинақталған. Олардың қатарына тау жыныстардың жылу өткізгіштігін өлшеу арқылы алынған анықтамалар мен қайтадан іске қосылған ұңғымалардың температура градиентінің анықтамалары кірді. Сонымен қатары Дүниежүзілік мәліметтер орталығының мәліметтері мен ашық дереккөздерден тау жынысының геотермиялық қасиеттері жайлы тәжірибелік мәліметтер қолданылды. Аймақтың жылулық өріс картасы келтірілген. Қауіпті құрлықтық тектоникалық аймақ үшін орташа дүниежүзілік мәліметтермен салыстыру арқылы жылулық өрістің жергілікті ерекшеліктері талданды. Солтүстік Тянь-Шань жер қыртысы үшін серпімді толқындардың жылдамдығы мен радиоактивті элементтердің ыдырау арқасында тау жыныстарының жылушығару ортасында талдамалы тәуелділік орнатылды. Тереңдеген сайын жылушығару элементтерінің қалыптасу заңдылығы талқылануда. Жер қыртысының көлемінде мантиялық және радиогендік жылулық өрістің таралу үлгісі талқылануда және келтірілді. Аймақтың сейсмикалық белсенділігі көрсетілген салыстырмалы талдау жасалды. Сейсмикалық тәртіптің қалыптасуына температуралық жағдайдың әсерінің басымдығы жайлы нәтиже көрсетілді.

**Түйін сөздер:** геотермия, жылулық өріс, радиогендік жылушығару, жер қыртысы, литосфера, мантиялық жылулық өріс, сейсмикалық.