

ГЕОТЕРМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ И СЕЙСМИЧНОСТЬ

Виляев А.В.¹, Жантаев Ж.Ш.², Бибосинов А.Ж.¹

¹ДТОО «Институт ионосферы», Республика Казахстан, Алматы, vilayev@gmail.com

²АО "Национальный центр космических исследований и технологий"

Введение. Одной из геофизических характеристик, определяющей физико-химическое состояние глубинного вещества и энергетические условия развития геодинамических процессов, является температура горных пород. Изучение теплового состояния земных недр особенно актуально для районов, где происходят интенсивные тектонические движения, сопровождаемые сильными и катастрофическими землетрясениями. Именно к таким районам относится Северный Тянь-Шань. В настоящей работе моделирование глубинного теплового поля реализовано численными методами. Под термином "геотермическая модель" понимается оценка глубинных температур и других геотермических параметров на основе комплексного использования геолого-геофизических и экспериментальных данных. Актуальность работы определяется необходимостью изучения энергетического источника возникновения землетрясений, а также перспективами практического использования созданной модели в задачах сейсморайонирования и оценки сейсмической опасности.

Методика исследований. Первый этап - разработка математической модели, реализующей теплофизическую модель и способ переноса тепла: запись законов теплопередачи в форме уравнений математической физики, выбор алгоритма решения, определение начальных и граничных условий, численная и программная реализация используемых уравнений, проведение расчетов, оценка точности вычислений.

Второй этап - построение теплофизической гетерогенной анизотропной модели земной коры и верхней мантии: оценка распределения в земной коре радиогенных источников тепла, коэффициента теплопроводности и теплового потока на поверхности.

Третий этап - анализ геотермической модели: сопоставление сейсмических параметров с температурными неоднородностями, определение особенностей участков земной коры по их геотермическим характеристикам, изучение влияния теплового поля на энергетическое состояние и сейсмичность территории, верификация модели.

Математическая модель. Основное уравнение кондуктивного переноса тепла в гетерогенной анизотропной упругой среде записывается в виде [6,24]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla k \nabla T + k \nabla^2 T + A(x, y, z, t) \quad (1)$$

где ρ , C_p , k - плотность, теплоемкость и теплопроводность горных пород в точке с координатами (x, y, z) , T - температура, t - время, A - радиоактивная генерация тепла в единичном объеме (размерности единиц в СИ). Символом ∇ обозначен дифференциальный оператор Лапласа в трехмерном пространстве

$$\nabla = \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \right) T \quad (2)$$

С учетом сферичности поверхности и значительных пространственных размеров модели уравнение решалось в сферических координатах относительно центра Земли:

$$\nabla T = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \quad (3)$$

Для глубин менее ста км, в случае достаточно долго протекающих геологических процессов, температурный режим можно считать стационарным. Уравнение (1) принимает вид:

$$\nabla k \nabla T + k \nabla^2 T + A(x, y, z) = 0 \quad (4)$$

Построение геотермических моделей на основе уравнений (1, 4) представлено в [2-4,6,8,11 и др.], способы их решения изложены в [6, 14-15 и др.]. В данной работе реализован метод конечных разностей на сетке $41 \times 31 \times 20$ км по экономичной схеме переменных направлений.

В качестве граничного условия теплообмена на поверхности Земли задавался тепловой поток, определенный по наземным измерениям в скважинах с корректировкой по спектральному спутниковым снимкам в ИК-диапазоне с поправкой за рельеф [1]. Среднегодовая температура земной поверхности на глубине 1 м (10°C) оценена по метеоданным. Боковые граничные условия состояли в равенстве нулю теплового потока через вертикальные границы модели. На нижней границе моделируемой области в узлах сетки задавалась мантийная составляющая теплового потока, определяемая как разность потока на поверхности и радиогенной составляющей от U, Th, K-

содержащих пород, а также постоянная температура, отвечающая нормальному геотермическому градиенту, в предположении о наличии на глубине 120 км области распространения горных пород, разогретых до температуры солидуса (1370 °С).

Теплофизическая модель. Основные элементы строения земной коры земной коры Северного Тянь-Шаня представлены в [5,7,17,18,23 и др.]. В геологическом отношении регион входит в альпийский неотектонический пояс и включает вытянутые в широтном направлении горные хребты Кунгей и Заилийский Ала-Тау на юге, Илийскую межгорную впадину и плато Карой в центральной части, Южно-Прибалхашскую и Саркандскую впадины на севере. С востока район ограничен отрогами горных хребтов Джунгарского Ала-Тау, с запада - восточным окончанием Чу-Илийских гор.

В земной коре по геофизическим данным выделяются осадочный, гранитный (верхний и нижний) и базальтовый слои [17,23]. Мощность земной коры изменяется от 42 км до 55-57 км, увеличиваясь в юго-восточном направлении в сторону горных сооружений Тянь-Шаня и Джунгарии. Наименьшая мощность коры устанавливается в альпийских впадинах, наибольшая - под горными хребтами.

Исходной экспериментальной базой моделирования явились данные детальной сейсмической 3D-томографии мантии до глубины 500 км в пределах территории с координатами 30°-50° N и 70°-100° E по данным методов ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ [20-21,17]. Скорости продольных волн определены по четырем субширотным и по шести субмеридиональным геотраверсам, совмещенным в плане с профилями по данным магнитотеллурического зондирования (МТЗ) [20-21,17] (рис. 1).

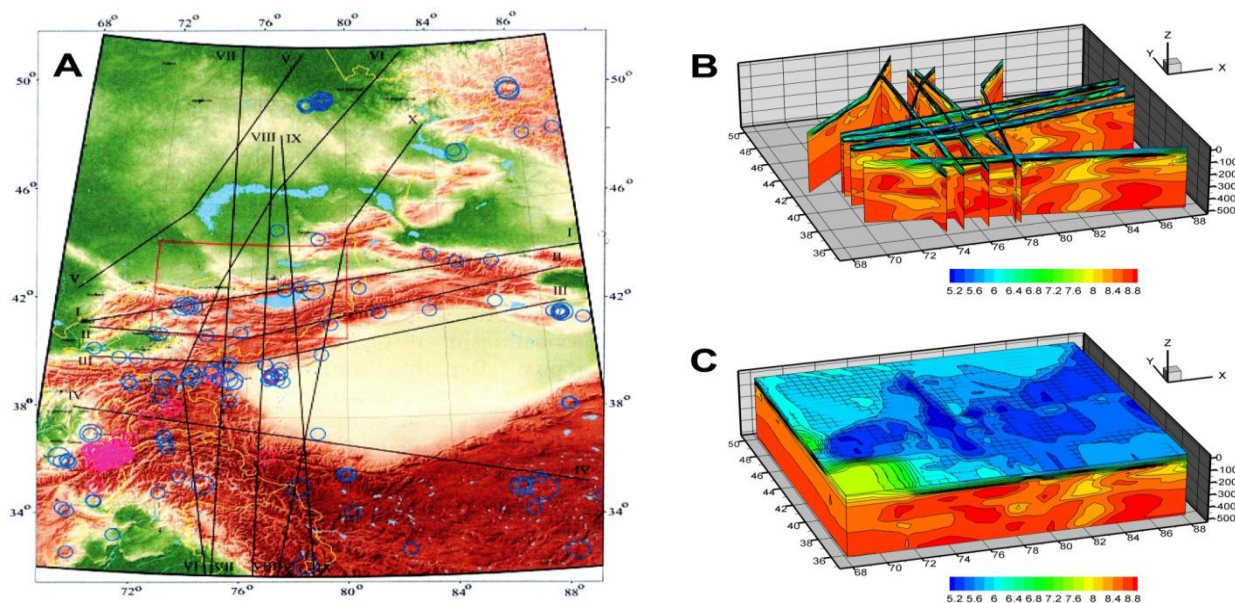


Рис. 1. Система геотраверсов Р-скоростного моделирования литосферы и эпицентры сильных землетрясений Центральной Азии: А – плановое положение геотраверсов, В – 2D модели по профилям, С - 3D скоростная модель строения земной коры высокой Азии: геотраверсы субширотные: I-I – Северо-Тяньшаньский, II-II – Срединно-Тяньшаньский, III-III – Южно-Тяньшаньский, IV-IV – Афгано-Таджикская депрессия-Тибет; субмеридиональные: V-V – Арысь-Балхаш-Славгородский, VI-VI – Памир-Сарыташ-Саяжский, VII-VII – Меридиан 750, VIII-VIII – Каскеленский, IX-IX – Иссыкский, X-X – Восточный.

В скоростной модели выделен 3D-блок земной коры и верхней литосферы в области ограниченной координатами 42-45° N, 75-80° E в диапазоне глубин 100 км, соответствующий изучаемому району. Дефицит информации по теплофизическим свойствам пород восполнен с помощью корреляционных связей последних и скоростей сейсмических волн V_p [24].

Модель теплопроводности литосферы Тянь-Шаня и прилегающей части Казахской платформы составлена по структурным комплексам и блокам, разделенным глубинными разломами [12,19,22]. Средние значения коэффициента теплопроводности осадочного слоя определены в диапазоне 1.5 - 1.7 Вт/м·К, гранитного – около 2.6, диоритового – 2.2-2.3 Вт/м·К, базальтового – 3-3.1 Вт/м·К. Для верхней мантии коэффициент теплопроводности принимался равным 3.2 Вт/м·К. Анализ изменения теплопроводности в зависимости от литологического состава показал, что осадочные породы характеризуются наименьшими величинами, промежуточные ее значения характерны для вулканогенных пород и высокие значения – для метаморфических. Также наблюдается увеличение

теплопроводности с возрастом пород от неогена к архею. Зависимость коэффициента кондуктивной теплопроводности от температуры учитывалось по формуле

$$k_m = 1.8418 + (k_o - 1.8418) \left(\frac{1}{0.002732 T + 0.7463} - 0.2485 \right) \quad (5)$$

где k_o теплопроводность при 20° С [24].

Распределение теплогенерации в земной коре за счет распада радиоактивных элементов определено с позиции их связи с сейсмическими скоростями горных пород [3,24-26]. Для коры Северного Тянь-Шаня применена корреляционная зависимость $A = a \cdot \exp(b \cdot V)$ в мкВт/м³, где a и b - эмпирические коэффициенты, V - скорость продольных волн (км/с). Значения коэффициентов a и b вычислялись методом наименьших квадратов по данным определений теплогенерации в различных породах и равны соответственно $0.3125 \cdot 10^5$ и -1.61 . Сопоставление оценок величин теплогенерации разных слоев земной коры по данным [13,16,19] и принятым зависимостям показало удовлетворительную сходимость с фактическим материалом. Следует отметить, что для различных регионов значения коэффициентов a и b , полученные методом наименьших квадратов, будут различаться.

При составлении схемы теплового потока на поверхности учитывались значения Мирового центра данных [<http://www.heatflow.und.edu/data.html>], карта территории СССР в масштабе 1:5 000 000 под редакцией В.В. Гордиенко и У.И. Моисеенко [10]. Дополнительно учтены 249 высокоточных скважинных измерений, из них 169 наблюдений на территории Юго-Восточного Казахстана и 70 - в прилегающих районах Киргизии. Прямые определения потока интерполированы на сетку размером 41×31 ячеек, соответствующих узлам геотермической модели. В значения теплового потока вводились поправки за искажающее влияние рельефа дневной поверхности с использованием спутниковых снимков в ИК-диапазоне [1].

Закономерности распределения ТП региона соответствует его распределению по мировым данным для районов кайнозойской тектонической активности: максимальные значения ТП отмечаются в сейсмически активных зонах, минимальные - в платформенных областях. Повышенные значения ТП фиксируются в основании крупных впадин. Средние значения плотности теплового потока составляют: Северный Тянь-Шань - 63 мВт/м², Джунгарский Ала-Тау - 56 мВт/м², Каройский блок - 58 мВт/м², Алма-Атинская впадина - 50 мВт/м², Джаркентская впадина - 46 мВт/м², Южно-Прибалхашская впадина - 45 мВт/м². Зоны активных разломов фиксируются аномальным выносом тепла (до 266 мВт/м²). Вклад радиогенной компоненты плотности теплового потока в общий ТП достигает от 60% до 90%, что значительно выше среднемировых данных для континентальной литосферы (20%, [3]).

С учетом суммарной погрешности определения теплового потока, теплопроводности, теплогенерации горных пород и ошибки вычислений, точность математического метода моделирования оценена не менее $\pm 80^\circ\text{C}$.

Геотермическая модель и анализ результатов

Фактологической основой геотермической модели Северного Тянь-Шаня (рис. 2) послужили измеренный на поверхности тепловой поток, модель теплогенерации и модель теплопроводности горных пород с учетом термобарической зависимости.

Структура теплового поля изучалась разделением расчетных температур на стационарную и аномальную части. Фоновые температуры получены осреднением расчетных температур двойным рекурсивным фильтром в прямом и обратном направлении. Аномальные температуры определены вычитанием из расчетного поля стационарной составляющей. Указанный прием разделения полей традиционно применяется в разведочной геофизике. Считается, что стационарная часть обусловлена глубинными источниками, имеющими региональное распределение. Аномальные температуры связаны с локальным разогревом пород вследствие сейсмотектонической активности или с поступлением глубинного тепла по ослабленным, трещиноватым зонам разломов.

Отмечается линейное понижение поля температур с юга на север. Горизонтальные градиенты в указанном направлении уменьшаются от 1.5° С/км для горных хребтов Джунгарии и Северного Тянь-Шаня до 0.5° С/км для Южно-Прибалхашской впадины. Область высоких градиентов оконтуривает по северной границе высокотемпературную аномалию, отмечаемую на разрезах в интервале глубин от 25 км до 35 км, локальными повышенными до 240°С температурами в южной части. Абсолютная температура в максимуме аномалии составляет 720° С на глубине 40 км, 950-1050° С на глубине 80 км и 1200° С на глубине 100 км. В Джунгарском блоке высокотемпературная область выражена локально и приурочена к верхней части границы Мохо.

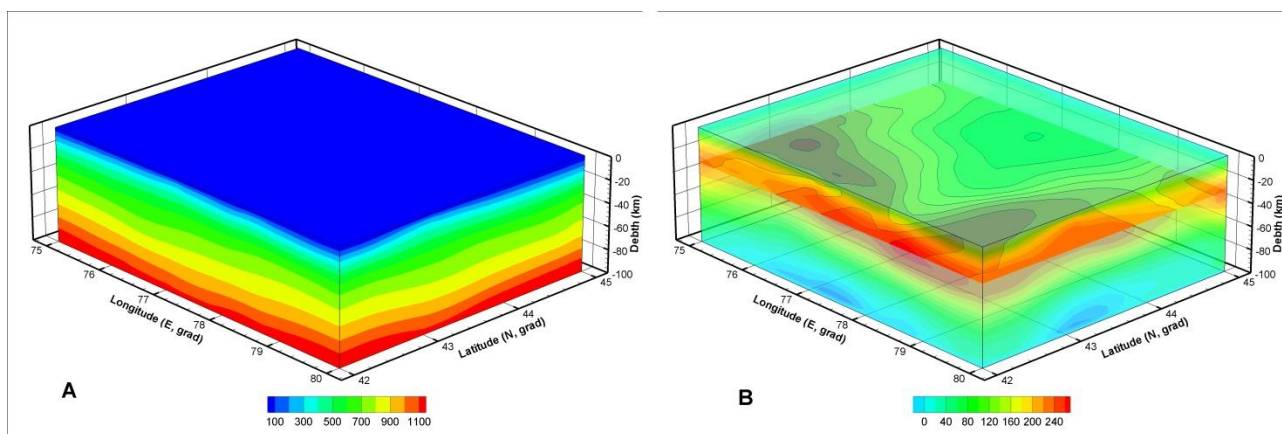


Рис. 2. Распределение температур в земной коре Северного Тянь-Шаня по данным моделирования. А – рассчитанное поле ($^{\circ}\text{C}$), В – срез аномальных температур на глубине 30 км.

Область повышенных аномальных температур частично сформирована особенностями распределения радиогенных источников тепла, приуроченных к породам гранитного (верхнего и нижнего) слоев земной коры (рис. 3А). Морфология региональной (фоновой) изоповерхности теплового потока в 60 мВт/м^2 указывает на возможный глубинный источник разогрева земных недр, обусловленный внедрением из мантии расплавленного материала. В рамках расчетной модели, ограниченной глубиной 100 км, выявляется лишь его верхняя часть (рис. 3В).

Основная часть гипоцентров землетрясений с величинами энергетического класса >8.5 за период с 1960 г. по настоящее время расположена на глубинах 10-25 км. Нижняя разогретая часть коры практически не содержит очагов землетрясений. По характеру взаимного расположения гипоцентров и морфологии поверхности теплового потока выделены центральная, юго-восточная Северо-Тянь-Шаньская и Джунгарская эпицентральные области субширотного простираения. В двух последних областях большая часть землетрясений тяготеет к областям пониженных значений глубинного теплового потока и приурочена к краевым «холодным» частям. Можно предположить здесь хрупкий механизм формирования землетрясений за счет снижения предела пластичности материала коры. Вопрос этот требует дополнительного изучения.

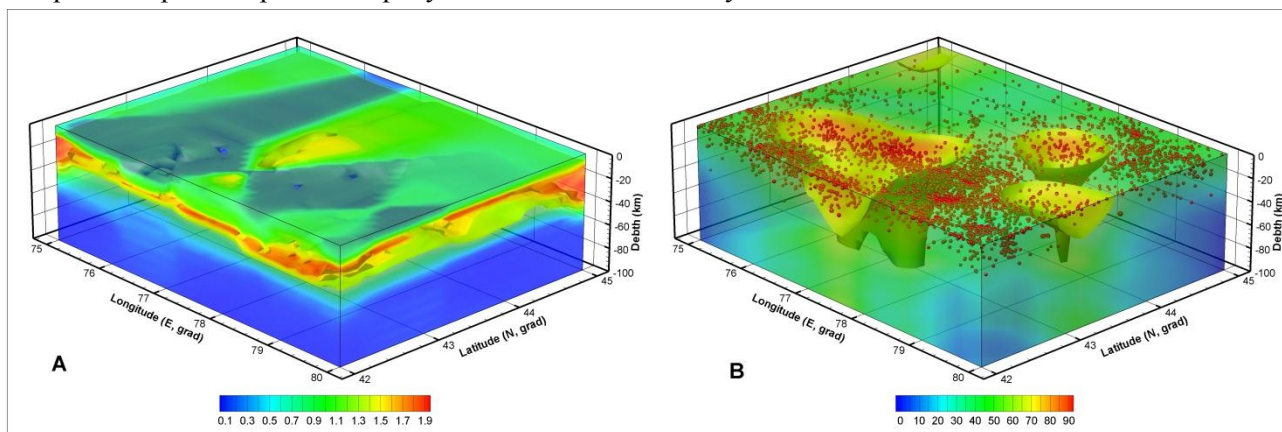


Рис. 3. А – модель распределение радиогенных источников тепла в мВт/м^3 в земной коре Северного Тянь-Шаня по данным моделирования; В – расчетная изоповерхность теплового потока в земной коре Северного Тянь-Шаня с гипоцентрами землетрясений (красные кружки)

Для центральной области концентрации гипоцентров характерны повышенные значения теплового потока и повышенные температуры. Авторы предполагают для этой зоны доминирующей роль фазовых превращений эклогит-базальт под воздействием высокотемпературных флюидов (более 650°C). Указанные температуры достигаются на глубинах 35-60 км. В соответствии с [9], в областях плавления увеличивается объем пород и уменьшается их плотность и, как следствие, над зоной плавления активизируются вертикальные движения в пределах земной коры (сводовобразование). Таким образом, происходит рост гор вверх за счет увеличения объема и рост "корней" гор вниз за

счет выплавления базальтов. Механизм фазовых превращений подтверждается наличием гравитационного минимума силы тяжести в редукции Буге и находит отражение в повышенной сейсмичности этой зоны в верхних частях земной коры.

Заключение. Геотермическое моделирование земной коры и верхней мантии Северного Тянь-Шаня показало:

- геотермическое поле дифференцировано по латерали и по вертикали; областям горных сооружений соответствует более высокая температура горных пород и градиенты ее изменения; отмечается увеличение глубинных температур с севера на юг - от платформенных областей Казахского щита к горным районам Северо-Тянь-Шаньского и Джунгарского блоков;

- определяющим в формировании теплового поля является наличие высокотемпературных областей с величинами температуры на 100-250° С выше солидуса, что может привести к частичному плавлению распространенных здесь горных пород.

- возможность применения геотермического моделирования для изучения природы сейсмического процесса и геодинамических особенностей Северного Тянь-Шаня.

Список литературы

1. Виляев А.В., Стихарный А.П., Серикбаева Э.Б. Оценка влияния рельефа методом сплайновой регрессии при изучении инфракрасного эмиссионного излучения поверхности Земли // Reports of national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. ISSN 2224-5227. V. 4. 2015. P.98-103.
2. Геотермические исследования в Средней Азии и Казахстане. - М.: Наука, 1985. - 268 с.
3. Гордиенко В.В., Завгородняя О.В., Якоби Н.М. Тепловой поток континентов. - Киев: Наукова думка, 1982. - 184 с.
4. Дучков А.Д., Соколова Л.С. Геотермические исследования в Сибири. - Новосибирск: Наука, 1974. -279с.
5. Земная кора сейсмоактивных районов Казахстана. - Алма-Ата: Наука, 1982. - 231 с.
6. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. - М.: Мир, 1964. - 487 с.
7. Курскеев А.К. Геофизическая характеристика земной коры Казахстана. - Алма-Ата: Наука, 1977. 190с.
8. Кутас Р.И., Цвященко В.А., Корчагин М.Н. Моделирование теплового поля континентальной литосферы. - Киев: Наукова думка, 1989. - 274 с.
9. Курскеев А.К., Абаканов Т.Д., Серазетдинова Б.З. Землетрясения, происхождение и прогнозирование. - Алматы, 2012, 314 с.
10. Карта теплового потока территории СССР. М: 1:5000000. / Ред. В.В. Гордиенко, У.И. Моисеенко // Киев, Ин-т геофизики АН Украины, 1991.
11. Любимова Е.А. Термика Земли и Луны. - М.: Наука, 1968. -279 с
12. Моисеенко У.И. Теплофизические свойства горных пород и глубинные температуры земной коры. / Физические процессы горного производства. Ленинград, 1982, вып. 12. С. 30-36.
13. Моисеенко У.И., Смыслов А.А. Температура земных недр. -Л.: Недра, 1986. - 180 с.
14. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов теплообмена. - М.: Наука, 1984. -288 с.
15. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. - М.: Наука, 1989. - 432 с.
16. Схема распределения температуры в земной коре на территории СССР на глубине 10 км. М: 1:10000000. Объяснительная записка. / ред. Моисеенко У.И. - Л.: ВСЕГЕИ, 1986. -31 с.
17. Тимуш А.В. Сейсмоструктура литосферы Казахстана – Алматы, 2011, 590с.
18. Тектоносфера Средней Азии и Южного Казахстана / Гордиенко В.В., Зуннунов Ф.Х., Таль-Вирский Б.Б. и др. - Киев: Наукова думка, 1990. - 232 с.
19. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). /Справочник геофизика. Москва: Недра, 1984. 455 с.
20. Шацкилов В.И., Горбунов П.Н. Глубинная структура земной коры Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского и Каратауского регионов //Сейсмическое районирование Республики Казахстан. - Алматы: Эверо, 2000. - С.75-96.
21. Шацкилов В.И., Степаненко Н.П. Геофизические критерии выявления очаговых зон сильных землетрясений на Тянь-Шане // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных районов. - Москва-Бишкек, 2003.- С.129-139.
22. Шварцман Ю.Г. Тепловой режим литосферы Тянь-Шаня. / Тектоносфера средней Азии и Южного Казахстана. Киев: Наукова думка,1990. С. 148-153.
23. Юдахин Ф.Н. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня. - Фрунзе: Илим, 1983. - 248 с.
24. Vincenzo P., Massimo V., Paolo Ch. Geothermics. Heat Flow in the Lithosphere // University of Genova, Springer, 2014, 127p.
25. Royer J.J., Danis M. Steady state the geothermal model of the crust and the problem of the boundary conditions: application to a rift system, the southern Rhinegraben. // Tectonophysics. - 1988. - vol. 156, - №3/4. - p.239-256.
26. Rybach L., Bantebarth G. Relationships between the petrophysical properties, density, seismic velocity, heat generation and mineralogical constitution // Earth and Planet Sciens letters. - 1982. - V. 57. - p.367-376.