

УДК 550.8.05 (235.216)

**ДВУХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ИЗОГЛУБИН ПОВЕРХНОСТИ КЮРИ  
КЫРГЫЗСКОГО ТЯНЬ-ШАНЯ ПО ДАННЫМ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУР  
РАДИОГЕННОГО ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ**

*В.В. Гребенникова*

Дана оценка вертикальной мощности магнитоактивной земной коры Кыргызского Тянь-Шаня с использованием результатов расчетов по определению теплового потока и температур на поверхностях Конрада (К) и Мохоровичича (М). Показан комплексный сопоставительный анализ геофизических полей по меридиональному профилю.

*Ключевые слова:* двухмерная модель; поверхность Кюри Кыргызского Тянь-Шаня; радиогенное теплое поле; землетрясение.

---

**TWO-DIMENSIONAL MODEL IZODEPTHS OF THE SURFACE CURIE  
OF THE KYRGYZ TIEN SHAN ACCORDING TO TEMPERATURE CALCULATION RADIOGENIC  
OF THE THERMAL FIELD**

*V.V. Grebennikova*

The estimation of vertical thickness of the crust Magnetoactive Kyrgyz Tien Shan using the results of calculations to determine the heat flux and the temperature on the surface of Conrad (K) and Moho (M) is given. The comprehensive comparative analysis of geophysical fields on meridional profile is shown.

*Keywords:* two-dimensional model; surface Curie Kyrgyz Tien Shan; radiogenic thermal field; earthquake.

Важным фактором, влияющим на характер магнитного поля на поверхности Земли, является положение поверхности Кюри, глубже которой все ферромагнитные минералы вследствие высокой температуры земных недр теряют свои магнитные свойства. Это связано с тем, что при нагревании ферромагнитных образований до температуры Кюри в них из-за возникновения теплового движения разрушаются области спонтанного намагничивания (домены), в результате чего собственное магнитное поле ферромагнетиков исчезает. При характеристике магнитных свойств горных пород определение положения точки Кюри имеет большое значение, поскольку она зависит от состава ферромагнитных минералов и не зависит от их процентного содержания, объема и формы. Главным среди породообразующих минералов – носителей магнетизма горных пород, является магнетит ( $Fe_3O_4$ ). По Т. Нагата [1] значение температуры Кюри для него равно  $57\ 8^{\circ}C$  ( $860^{\circ}K$ ).

Положение поверхности Кюри не только влияет на характер магнитного поля, но и объективно отражает состояние и внутреннюю энергию зем-

ных недр, являясь функцией температуры последних. В верхних горизонтах земной коры при формировании аномального магнитного поля сильно проявляется остаточная намагниченность горных пород в связи с разным направлением намагниченности геологических тел. С возрастанием глубины проявляется индуктивная и вязкая намагниченность. На средних и нижних глубинах (для континентов  $\approx -35-40$  км) физические свойства горных пород резко меняются – проявляется граница Мохоровичича (М).

Проблема оценки нижней кромки залегания поверхности Кюри и установления зависимости аномального магнитного поля (АМП) от её гипсометрического положения, предпринимались многими исследователями. По данным V.N. Lugovenko, E.A. Pchelkin, Yu.A. Burtsev [2] среднее значение вертикальной мощности магнитоактивной коры континентов соответствует  $-35$  км. На территории Кыргызского Тянь-Шаня по А.А. Смыслову, У.И. Моисеенко, Т.З. Чадович [3], температура на глубине  $-30$  км изменяется от  $800$  до  $1000\ ^{\circ}C$ . Исходя из этого, поверхность Кюри должна рас-

полагаться здесь на глубинах около –20 км. По Я.Б. Смирнову [4] глубина залегания изотерм Кюри составляет в межгорных впадинах выполненных кайнозойскими отложениями –35±15 км, в кайнозойских горноскладчатых сооружениях эвгеосинклинальных зон –15±5 км, миогеосинклинальных зон –20±5 км. В пределах Западного Тянь-Шаня по И.А. Фузайлову [5], глубина залегания поверхности Кюри –33–35 км. По данным К.Е. Калмурзаева, Ф.Н. Юдахина, В.А. Белицкого, В.В. Нургазиевой (В.В. Гребенникова) [6], на территории Кыргызского Тянь-Шаня поверхность Кюри располагается на глубинах от –22 км до –47 км, что находится в соответствии с данными [2–5].

Автором настоящей статьи уточнены и проведены дополнительные расчеты глубины залегания поверхности Кюри в каждом из узлов равномерной сети по меридиональным профилям I–XXI. Расчет

глубины залегания поверхности Кюри производился по формуле [6]:

$$860^2 K = \frac{h^2 (q_p - q_0) + \frac{h}{\lambda} (q_0 - q_p)}{2}, \quad (1)$$

где  $h$  – глубина залегания поверхности Кюри от дневного рельефа, км;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м · К)  $10^3$ ;  $q_0$  – суммарный радиогенный тепловой поток в точке земной поверхности, Вт/км $^2$  ·  $10^4$ ;  $q_p$  – радиогенный тепловой поток в точке, лежащей на глубине поверхности Кюри, Вт/км $^2$  ·  $10^4$ ;  $q_p'$  – объемная генерация радиогенного тепла в 1 км $^3$  вещества коры для каждого узла расчетной сети, Вт/км $^3$  ·  $10^3$ ;  $q_0'$  – объемная генерация радиогенного тепла в 1 км $^3$  вещества коры для точки, лежащей на глубине поверхности Кюри, Вт/км $^3$  ·  $10^3$ ;  $860^2 K$  – значение температуры Кюри в градусах Кельвина

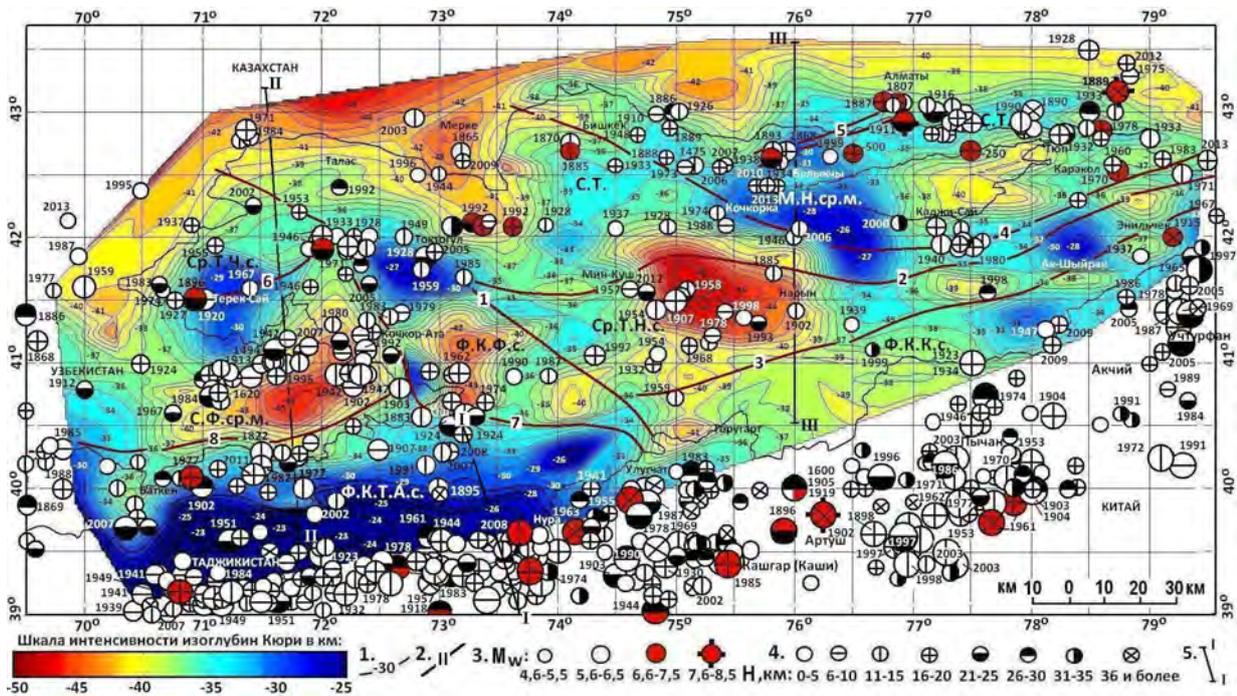


Рисунок 1 – Двухмерная модель изоглубин поверхности Кюри Кыргызского Тянь-Шаня по данным расчета температур радиогенного теплового поля: 1. Изоглубины поверхности Кюри. 2. Основные глубинные разломы, разделяющие различные складчатые области и срединные массивы: 1. Таласо-Ферганский, 2. Линия “Николаева”. 3. Атбашо-Иньильчекский. 4. Центально-Терскаий. 5. Чилико-Кеминский. 6. Атойнокский. 7. Восточно-Ферганский. 8. Южно-Ферганский. Буквенные обозначения [6]: (С.Т.) – каледонская складчатая область Северного Тянь-Шаня; (М.Н.ср.м.) – Муонкумо-Наратский срединный массив; (Ср.Т.) – Каледонско-герцинская область Срединного Тянь-Шаня; (Н.с.) – Нарынский сектор, (Ч.с.) – Чаткальский сектор, (С.Ф.ср.м.) – Сырдарыно-Ферганский срединный массив, (Ф.К.) – Фергано-Кокшальская герцинская складчатая область; (К.с.) – Кокшальский сектор, (Т.А.с.) – Туркестано-Алайский сектор, (Ф.с.) – Ферганский сектор. 3. Эпицентры землетрясений и их форшоков, афтершоков с Mw ≥4,6 с 250 г.н.э. по 2014 г. (выборка по [9, 10]). 4. Глубина гипоцентра (Н, км). 5. I–I – линии геофизических профилей

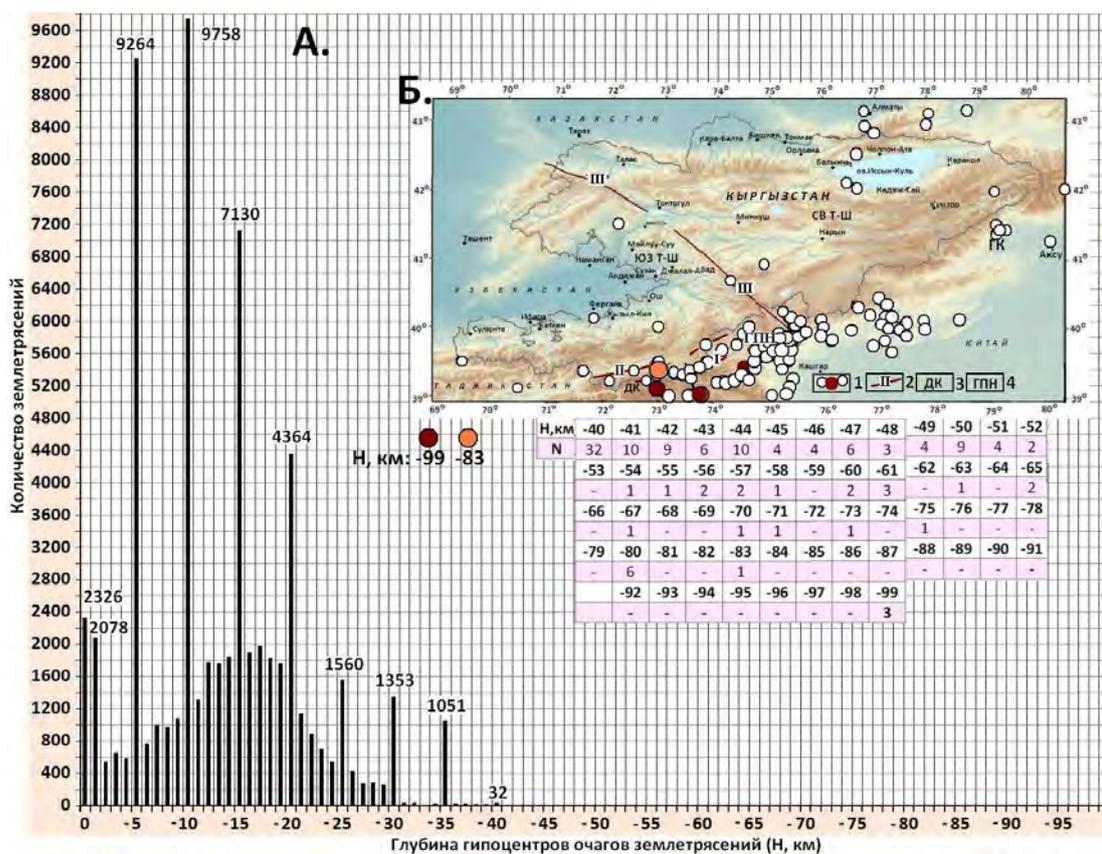


Рисунок 2 – А. Гистограмма глубины гипоцентров очагов землетрясений (Н, км) с магнитудой  $M \geq 2,4$  и более, произошедших в координатах  $\varphi = 39,00-43,50^\circ N$ ,  $\lambda = 69,00-81,00^\circ E$  с исторических времен (с 250 г.н.э.) по 2014 г.

Б. Карта-схема эпицентров землетрясений с глубиной гипоцентров от  $-40$  до  $-99$  км:

1. Эпицентры землетрясений; 2. Разломы: I – Дарваз-Каракульский, II – Заалайский, III – Таласо-Ферганский;
3. Сейсмогенные зоны: ДК – Дарваз-Каракульская, ГК – Гиссаро-Кокшаальская; 4. ГПН – Главный Памирский надвиг (Заалайский разлом)

для магнетита, являющееся также средним значением температуры Кюри для магматических пород.

В связи с тем, что формула (1) является частным случаем решения стационарного уравнения теплопроводности [3, 7], то она решалась, как квадратное уравнение относительно  $h$  – глубины залегания поверхности Кюри. Ввиду того, что значения  $\lambda$ ,  $q_p$ ,  $q_0$  имеют переменный характер, использовался метод регуляризации. С помощью применения алгоритмов объемной триангуляции к базе полученных расчетов в среде программирования MATLAB, построена двухмерная модель (2D) карты изоглубин поверхности Кюри Кыргызского Тянь-Шаня (рисунок 1). На рисунке 1 видно, что изолинии глубин поверхности Кюри, в основном, согласуются с направлениями основных глубинных разломов Тянь-Шаня (Таласо-Ферганский (1), Линия “Николаева” (2), Атбаши-Иныльчекский

(3), Южно-Ферганский (8) и др.), разграничивающих различные складчатые области и срединные массивы. Наибольший перепад глубин поверхности Кюри от  $-26$  км до  $-48$  км отмечается к юго-западу от Таласо-Ферганского разлома (1). В пределах северного обрамления Ферганской впадины – в Чаткальском секторе (Ч.с.) каледонско-герцинской области Срединного Тянь-Шаня (Ср.Т.) и к юго-западу от него, отмечается поднятие поверхности Кюри до глубин  $-26$  км относительно дневного рельефа. В плане поднятие изотерм Кюри, выражено двумя изометричными минимумами глубин, что хорошо согласуется с наличием здесь Кураминской положительной аномалии теплового потока [6, 8]. Наиболее близко, до  $-23$  км относительно дневного рельефа, поверхность Кюри поднимается в Туркестано-Алайском секторе (Т.А.с.) Фергано-Кокшаальской герцинской складчатой

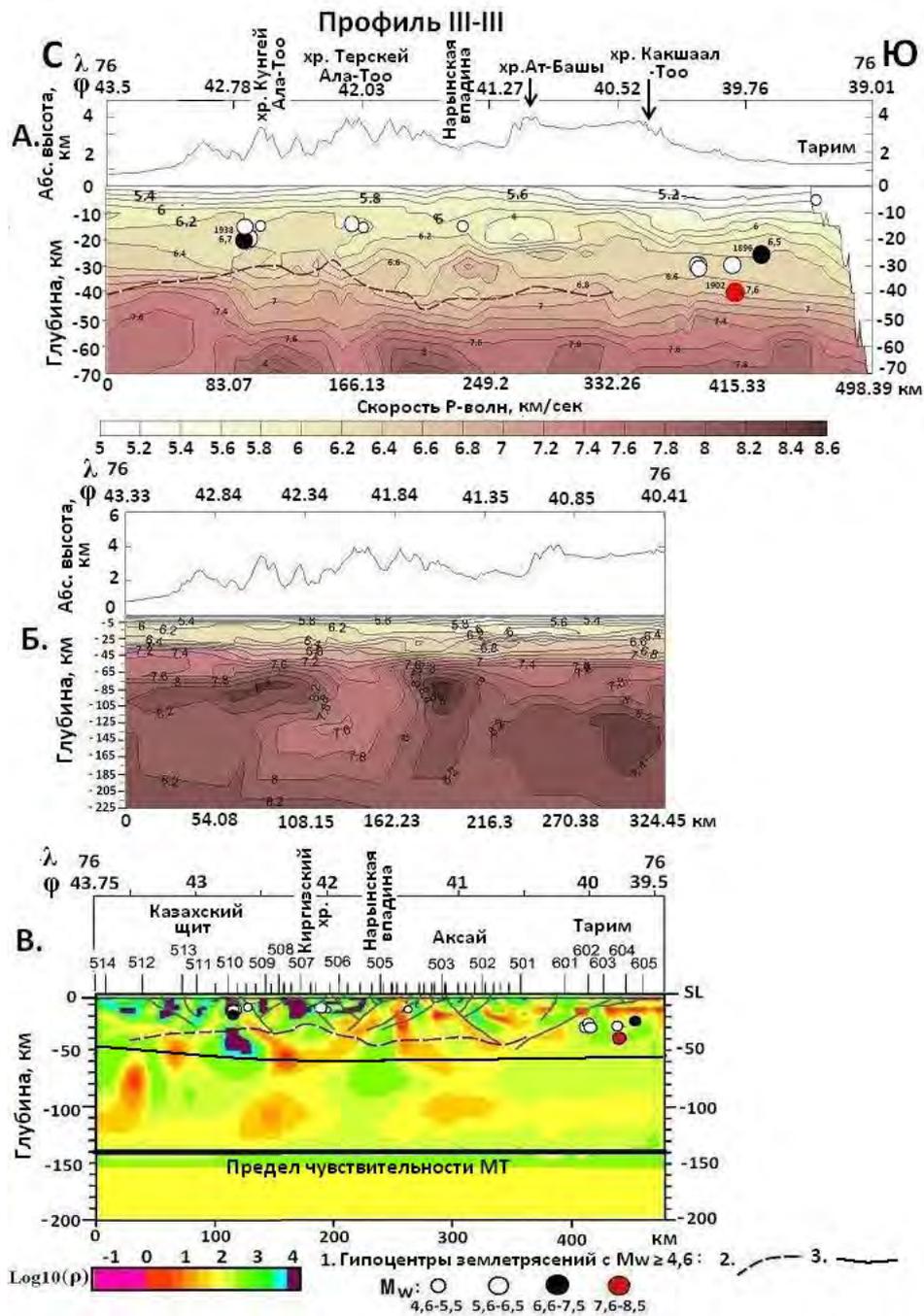


Рисунок 3 – Скоростные разрезы Р-волн по профилю III-III ( $\varphi = 43,50^\circ - \lambda = 76,00^\circ$ ;  $\varphi = 39,01^\circ - \lambda = 76,00^\circ$ ) по [11]:  
**А** – коры; **Б** – кора-мантия, **В** – модель геоэлектрического ( $\rho$ ) по [12]: 1. Гипоцентры землетрясений, их форшоков и авершоков с  $M_w$  более 4,6 по [9, 10]; 2. Граница нижней крошки залегания поверхности Кюри; 3. Поверхность Мохоровичича (М) по [13]

области (Ф.К.) – в районе Туркестанского, Заалайского хребтов и Алайской долины. Наибольшее погружение поверхности Кюри до –46 км наблюдается в Сырдарьино-Ферганском срединном массиве (С.Ф.ср.м.) центральной части Ферганской впадины (центр максимума:  $\varphi = 43,75^\circ$ ,  $\lambda = 71,75^\circ$ ).

К северо-востоку от Таласо-Ферганского разлома (1) – в каледонской складчатой области Северного Тянь-Шаня (С.Т.), Муюнкумо-Наратском срединном массиве (М.Н.ср.м.), в пределах Нарынского срединного массива каледонско-герцинской области Срединного Тянь-Шаня (Ср.Т.Н.с) и Кокшаальском секторе Фергано-Кокшаальской герцинской складчатой области (Ф.К.К.с.) наблюдается перепад глубин поверхности Кюри от –26 км до –46 км. До –26 км относительно дневного рельефа поверхность Кюри поднимается только в зоне Центрально-Терскейского разлома (4) (центр минимума:  $\varphi = 41,95^\circ$ ,  $\lambda = 76,49^\circ$ ). Отдельные локальные поднятия изотерм Кюри расположены в пределах хребтов Акшийряк –28 км, Борколдой –30 км и в долине р. Чон-Кемин –30 км. Наибольшее погружение – до –48 км, изотерм Кюри отмечается в пределах Нарынского срединного массива (оз. Сонг-Кель) каледонско-герцинской области Срединного Тянь-Шаня (Ср.Т.Н.с.).

На карте изоглубин поверхности Кюри (рисунок 1) нанесены эпицентры исторических (с 250 г.н.э.) по 2014 г. землетрясений и их форшоков, афтершоков с  $M_w \geq 4,6$  ( $M_w$  – расчетная моментная магнитуда:  $M_w = 0,5 K_R - 1,3$  по [9]). Выборка землетрясений проведена по [10], содержащего 132608 событий различной силы, произошедших в координатах  $\varphi = 39,00-43,50^\circ N$ ,  $\lambda = 69,00-81,00^\circ E$ . Из 132608 землетрясений отсутствуют определения глубины у 69070. Из 63538 событий 211 имеют глубины гипоцентров от –36 до –99 км (рисунки 2А-Б). На рисунке 2А видно, что гипоцентры очагов землетрясений располагаются, в основном, на глубинах от 0 до 20 км, т. е. в магнитоактивной толще. Исключение составляют гипоцентры древних землетрясений (Чилик, 1889 г., Кашгар (Артуш), 1902 г. и др.) и землетрясения с глубиной гипоцентров от –40 км и более, произошедших и происходящих в сейсмогенных зонах: Дарваз-Каракульской (ДК), Гиссаро-Кокшаальской (ГК) и в зоне Главного Памирского надвига (ГПН) (рисунок 2Б).

Очаговые области сильных землетрясений в основном приурочены к участкам наибольшего поднятия поверхности Кюри (рисунок 1): западная часть озера Иссык-Куль, восточная часть Центрально-Терскейского разлома (4), район Чаткальского и Атойнокского хребтов, область

к югу от Алайского хребта и восточная часть Кокшаальского хребта. Наибольшие погружения поверхности Кюри в центральных частях крупных межгорных впадин (Ферганская, Нарынская и др.) согласуются с относительно низкой сейсмической активностью и наличием очагов землетрясений с  $M_w$  до 5,7 (Куланак, 1948 г.  $M_w = 5,5$ ; Дюрбельджин 1954 г.  $M_w = 5,7$ ; Кавак, 1957 г.  $M_w = 5,2$ ; Сонкуль, 1958 и 1965 гг.  $M_w = 5,2$ ; Дюрбельджин, 1968 г.  $M_w = 5,0$ ).

На рисунке 3 показан геофизический профиль III-III (начало  $\varphi = 43,50^\circ - \lambda = 76,00^\circ$ , конец  $\varphi = 39,01^\circ - \lambda = 76,00^\circ$ ), который пересекает с севера на юг Северо-Восточный Тянь-Шань.

На профиле видно, что очаги землетрясений  $M_w$  более 4,6 с глубиной от –13 км до –21 км, локализируются в пределах скоростей Р-волн от 6,2 до 6,8 км/с. Поверхность Кюри тяготеет к зоне повышенных градиентов скорости. Она огибают очаговые области землетрясений и под северными предгорьями Кокшаальского хребта погружается до –40 км. На геоэлектрическом разрезе (рисунок 3В), в средней и нижней коре (25–50 км) выделяется мощный проводящий слой сопротивлением до 35–40 Омм, к которому приурочены гипоцентры очагов землетрясений с  $M_w$  более 4,6. В южном направлении электросопротивление уменьшается до 10 Омм, и под Нарынской впадиной в проводящем слое возникают резкие вертикальные подьёмы его к поверхности с понижением электросопротивления от 30 до 4 Омм.

#### Литература

1. *Нагата Т.* Магнетизм горных пород / Т. Нагата. М.: Мир, 1965. 216 с.
2. *Lugovenko V.N.* et al. The anomalous magnetic field interpretation by means of alternate height survey / V.N. Lugovenko, E.A. Pchelkin, A. Yu. Burtsev // Proc. Intern. Symp. On Geomagnetism. Shanghai. China, 1990. 45 p.
3. *Смыслов А.А.* и др. Тепловой режим и радиоактивность земли / А.А. Смыслов, У.И. Моисеенко, Т.З. Чадович. Л.: Недра, 1979. 191 с.
4. *Смирнов Я.Б.* Связь теплового поля со строением и развитием земной коры и верхней мантии / Я.Б. Смирнов // Геотектоника. 1968. № 6. С. 3–25.
5. *Фузайлов И.А.* Аномальное магнитное поле и его связь со строением земной коры / И.А. Фузайлов // Земная кора и верхняя мантия Средней Азии. М.: Наука, 1977. С. 120–133.
6. *Калмурзаев К.Е.* и др. Поверхность Кюри Киргизского Тянь-Шаня по данным расчёта температуры радиогенного теплового поля / К.Е. Калмур-

- заев, Ф.Н. Юдахин, В.А. Белицкий, В.В. Нургазиева // Изв. АН Кирг. ССР. 1982. № 2. С. 25–29.
7. Тихонов А.Н. О влиянии радиоактивного распада на температуру земной коры / А.Н. Тихонов // Изв. АН СССР. Сер. география и геофизика. 1937. № 3. С. 37–44.
  8. Таль-Вирский Б.Б. и др. Глубинный тепловой поток и некоторые его источники / Б.Б. Таль-Вирский, Р.А. Магдиев // Земная кора и верхняя мантия Средней Азии. М.: Наука. 1977. С. 56–79.
  9. Мамыров Э. Землетрясения Тянь-Шаня: магнитуда, сейсмический момент и энергетический класс / Э. Мамыров. Бишкек: Инсанат. 2012. 234 с.
  10. Каталог землетрясений Института сейсмологии НАН КР.
  11. Сабитова Т.М. и др. Скоростные неоднородности литосферы Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью / Т.М. Сабитова, Н.Х. Багманова, Е.Л. Миркин // В сб.: Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геологические проблемы. Москва–Бишкек: ДЭМИ, 2015. С. 406–415.
  12. Матюков В.Е. Оценка достоверности геоэлектрических построений по профилю “TIRAGE-ALAI” с учетом результатов других геофизических методов / В.Е. Матюков // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Бишкек: НС РАН. 2015. С. 99–102.
  13. Погребной В.Н. и др. Особенности тектонической структуры поверхности Мохо на территории Кыргызского Тянь-Шаня по гравитационным данным / В.Н. Погребной, В.В. Гребенникова // В сб. Современные проблемы геодинамики и геологические внутриконтинентальных орогенов. Москва–Бишкек, 2012. Т. 2. С. 100–105.