

NEWS

**OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES**

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 315 (2017), 26 – 34

UDC: 550.3; 550.36; 551.24

Zh.Sh. Zhantaev¹, A.V. Vilyayev¹, E.B. Serikbaeva¹

¹ National Center of Space Research and Technology, Institute
of Ionosphere, Republic of Kazakhstan, Almaty, Kamenskoe Plateau
vilyayev@gmail.com

**THE APPLICATION OF GEOTHERMAL MODELING
IN THE ASSESSMENT OF THE FEATURES
OF THE SEISMIC REGIME OF THE NORTHERN TIEN SHAN**

Abstract. The effect of temperature distribution of the earth's crust on the formation of seismic activity on the example of the Northern Tien Shan is considered. Data on the parameters of the heat flow are generalized and systematized. The experimental material on the physical properties of rocks, direct determinations of the heat flow at the surface, and correlation relationships of geothermal parameters with seismic velocities were used. The distribution of heat-generating elements with depth is considered. Compiled 3D geothermal models. A comparative analysis of the model with manifestations of seismic activity was performed.

The three-dimensional equation of conductive heat transfer with initial and boundary conditions and with additional sources of radiogenic heat is solved by numerical methods.

Under the mountain structures of the Northern Tien Shan at depths of 35-60 km, areas of partial melting with rock temperatures at 100 ÷ 250 °C above the solidus are identified. The field of thermoelastic deformations, reaching from 20 to 40% of the total lithostatic pressure, is calculated. Areas of the earth's crust are identified in which rocks are under conditions of thermal stresses exceeding their critical strength. A comparative analysis with manifestations of seismic activity of the territory was carried out. According to the morphology of the regions of anomalous temperatures and thermal stresses, the criteria controlling the distribution of hypocenters of earthquakes are determined. The strongest catastrophic earthquakes of the last century (Vernenskoye M = 7.1, Keminskoye M = 8.0) occurred in the regions of maximum influx of mantle heat.

A conclusion is made about the prevailing influence of temperature conditions on the development of the seismic process.

Key words: temperature, heat flow, thermal stress, earth crust, seismicity, mathematical modeling.

УДК: 550.3; 550.36; 551.24

Ж.Ш. Жантаев¹, А.В. Виляев¹, Э.Б. Серикбаева¹

¹Национальный центр космических исследований и технологий,
Институт ионосферы, Республика Казахстан, Алматы, Каменское плато

**Применение геотермического моделирования
в оценке особенностей сейсмического режима
Северного Тянь-Шаня**

Аннотация. Рассматривается воздействие неравномерного распределения температуры земных недр на формирование сейсмической активности на примере территории Северного Тянь-Шаня. Обобщены и систематизированы данные о параметрах теплового потока земной коры. Выявлены закономерности распре-

деления теплогенерирующих элементов с глубиной, составлены объемные 3D геотермические модели. Выполнен сравнительный анализ геотермической модели с проявлениями сейсмической активности.

Численными методами решено трехмерное уравнение кондуктивного теплопереноса с начальными и граничными условиями и с учетом дополнительных источников радиогенного тепла. Тепловой поток на поверхности определен по данным наземных измерений в скважинах. Привлечена информация о распределении в разрезе скорости продольных волн, зависимости коэффициента теплопроводности от петрологического состава горных пород, температуры и давления.

Под горными сооружениями Северного Тянь-Шаня на глубинах 35-60 км выделены области частичного плавления с температурами пород на 100÷250 °С выше солидуса. По изотерме аномальных температур в 230 °С и изобаре термоупругих напряжений интенсивностью 0.35 GPa оконтурена область температурных нагрузок, превышающих критическую прочность горных пород. Максимальные значения термонапряжений в аномальной области достигают 0.48 GPa, что составляет 25÷30% от литостатического давления. Наиболее сильные катастрофические землетрясения прошлого века (Верненское $M=7.1$, Кеминское $M=8.0$) произошли в областях максимального привноса мантийного тепла.

Делается вывод о преобладающем влиянии температурных условий на формирование сейсмического процесса.

Ключевые слова: температура, тепловой поток, термонапряжение, земная кора, сейсмичность, математическое моделирование.

Введение

Температурное поле в большой степени определяет физическое состояние материала литосферы Земли. Изучение теплового состояния земных недр особенно актуально для районов, где происходят интенсивные тектонические движения, сопровождаемые сильными и катастрофическими землетрясениями [1]. К таким районам относится Северный Тянь-Шань. Об этом свидетельствуют происшедшие здесь землетрясения: Верненское ($M_s=7.1$, 1887г.), Чиликское ($M_s=8.1$, 1889г.), Кеминское ($M_s=8.0$, 1911г.), Жаланашское ($M_s=6.8$, 1978г.), Байсорунское ($M_s=5.9$, 1990г.) и др. Цель работы заключалась в изучении распределения глубинного теплового поля земной коры Северного Тянь-Шаня для оценки сейсмической активности территории.

Метод и материалы исследований

Метод исследований состоял в численном моделировании температур земной коры на основе решения уравнений теплопередачи с привлечением экспериментальных теплофизических параметров – теплового потока, коэффициента теплопроводности, радиогенной теплогенерации. Выполнен сравнительный анализ параметров расчетной геотермической модели с распределением землетрясений территории.

Математическая модель. Основное уравнение стационарного кондуктивного переноса тепла для долговременных геологических процессов в гетерогенной анизотропной упругой среде записывается в виде [2]:

$$\nabla k \nabla T + k \nabla^2 T + A(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

где k – теплопроводность горных пород в точке с координатами (x, y, z) , T – температура, $A(x, y, z)$ – радиоактивная генерация тепла в единичном объеме. Символом ∇ обозначен дифференциальный оператор Лапласа в трехмерном пространстве

$$\nabla = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T \quad (2)$$

Коэффициент теплопроводности в точке (x, y, z) с учетом зависимости от температуры рассчитан нами для региона Северного Тянь-Шаня, как:

$$k = 0.01157 V_p^3 * (-0.9 + 0.00246 T + 343 T^{-1})^{-1} \quad (3)$$

где: V_p – скорость сейсмических волн (км/с), T – начальная температура в К°.

Радиогенное тепловыделение в земной коре за счет распада радиоактивных элементов ^{40}K , ^{238}U и ^{232}Th вычислено по эмпирическому соотношению между теплогенерацией A (мкВт/м³) и скоростью V_p (км/с) для земной коры Северного Тянь-Шаня:

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

Уравнение (1) с учетом (3,4) решено численным методом конечных разностей на сетке $41 \times 31 \times 20$ по схеме переменных направлений [3].

В качестве граничного условия теплообмена на поверхности задавался тепловой поток по измерениям в скважинах; среднегодовая температура земной поверхности 10°C на глубине 1 м по метеоданным. Начальное распределение температуры соответствовало линейному геотермическому градиенту. Боковые граничные условия состояли в равенстве нулю теплового потока через вертикальные границы модели. На нижней границе моделируемой области задавалась мантийная составляющая теплового потока, определяемая как разность потока на поверхности и радиогенной составляющей от распада U, Th, K-содержащих пород, а также постоянная температура, в предположении о наличии на глубине 120 км области горных пород, разогретых до температуры солидуса (1370°C).

Для расчета действующих термонапряжений в земной коре применена рабочая формула [5]

$$\tau_{zz} = \rho g z + 3\beta K (T - T_0) \quad (5)$$

где 3β - объемный коэффициент термического расширения пород, K - модуль объемной упругости, ρ - плотность, g - ускорение силы тяжести, $(T - T_0)$ - температурное отклонение от начального линейного распределения. Произведение $3\beta K (T - T_0)$ обозначает термонапряжения, вызванные сочетанием нелинейного изменения температуры. Модуль объемной упругости K рассчитан по отношению скоростей продольных и поперечных волн в условиях естественного залегания горных пород:

$$K = \rho(V_p^2 - 4/3 V_s^2) \quad (6)$$

где для горных пород Северного Тянь-Шаня $V_p/V_s = 2.04$.

Плотность горных пород определена в каждом узле сеточной модели по закону линейной аппроксимации:

$$\rho = (0.315V_p + 0.74) \cdot 10^3 \quad (7)$$

С учетом сферичности поверхности и значительных пространственных размеров модели уравнение (1) решалось в сферических координатах относительно центра Земли:

$$\nabla T = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \quad (8)$$

3. Обсуждение результатов

Теплофизическая модель. В геологическом отношении регион входит в альпийский неотектонический пояс и включает вытянутые в широтном направлении горные хребты Кунгей и Заилийский Ала-Тау разделенные межгорными впадинами [4]. 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. Мощность земной коры изменяется от 42 км до 55-60 км, увеличиваясь в юго-восточном направлении в сторону горных сооружений Тянь-Шаня и Джунгарии.

Структура поля сейсмических скоростей. Исходной экспериментальной базой глубинного строения земной коры послужили данные о скорости продольных волн до глубины 100 км в пределах территории с координатами $42^\circ - 45^\circ\text{N}$ и $75^\circ - 80^\circ\text{E}$ по данным методов ГСЗ, ГСЗ-МОВЗ [6-8] (рис. 1).

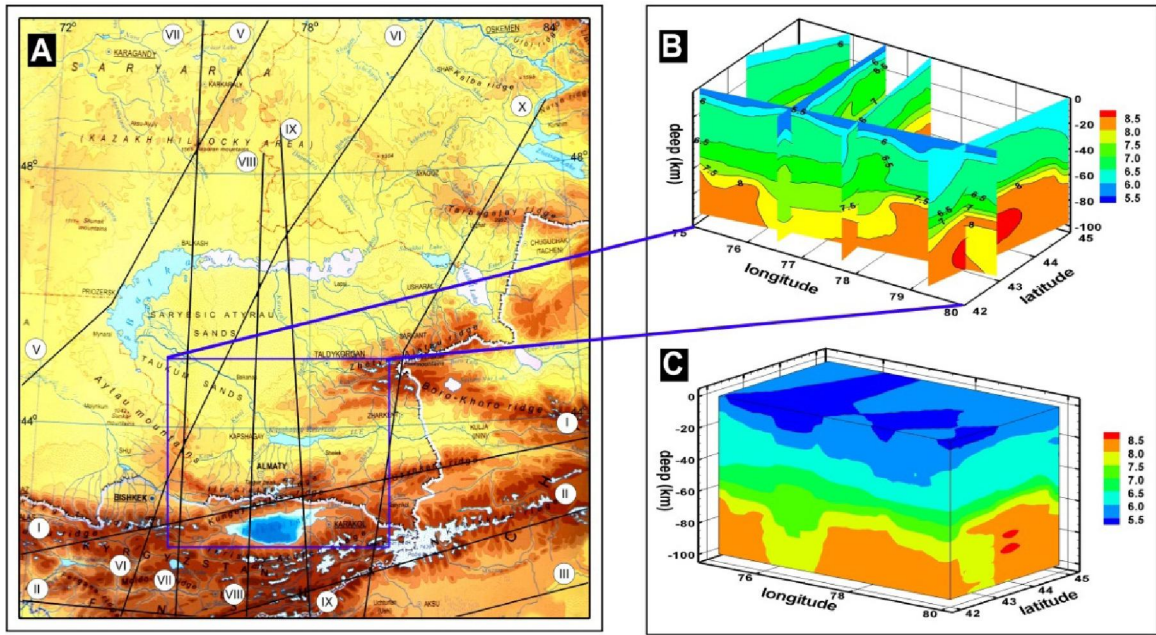


Рисунок 1 – Система геотравверсов Р-скоростного моделирования литосферы: А – плановое положение геотравверсов, В – 2D модели по профилям, С - 3D скоростная модель строения земной коры

Теплопроводность. 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 соответствует 3.2 Вт/м·К.

Радиогенная теплогенерация. Сопоставление оценок величин теплогенерации разных слоев земной коры по данным [9-11] и формуле (4) показало удовлетворительную сходимость. 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.

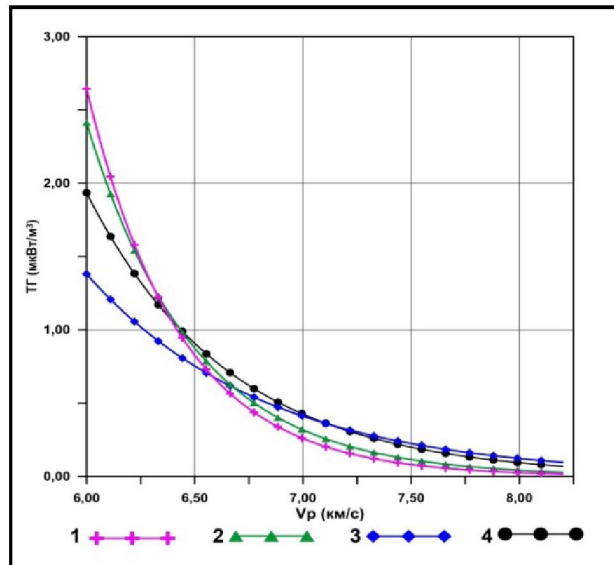


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности радиогенного тепловыделения в породах земной коры от скорости упругих волн: 1 – [9], 2 – [10], 3 – [11], 4 – формула (4)

Теплогенерация гранитного слоя составляет от 1.0 до 2.0 мкВт/м³, осадочного – от 0.2 мкВт/м³ до 1.0 мкВт/м³. С глубиной радиоактивное тепловыделение уменьшается неравномерно. Нижняя часть гранитного слоя горных областей характеризуется интенсивностью 0.6÷1.1 мкВт/м³, платформенной части - 0.5÷1.0 мкВт/м³. Теплогенерация базальтового слоя равна 0.5 мкВт/м³.

Тепловой поток. Карта теплового потока (ТП) на поверхности составлена по данным [12,13]. Кроме того учтены 249 скважинных измерений, выполненных авторами. Средняя плотность пунктов определений теплового потока составляет 1 измерение на 18 км²

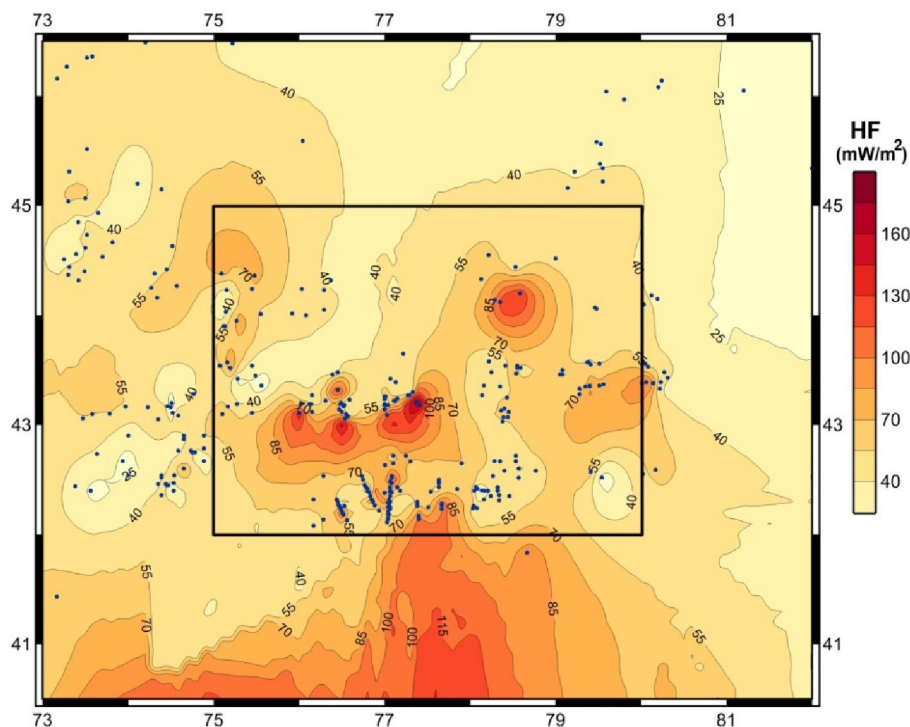


Рисунок 3 – Тепловой поток Северного Тянь-Шаня (мВт/м²), о – пункты определений в скважинах

Распределение ТП региона соответствует данным для районов кайнозойской тектонической активности. Выделены три области с различным режимом теплового потока: - высокогорные районы, платформенная часть и современные межгорные впадины. Высокогорные районы характеризуются повышенным уровнем теплового потока от 54 мВт/м² до 266 мВт/м² при среднем значении 63 мВт/м². Плотность теплового потока в межгорных впадинах меняется от 31 мВт/м² до 119 мВт/м² при среднем значении 54 мВт/м². Тепловой поток платформенной части территории составляет 40÷45 мВт/м². Вклад радиогенной компоненты теплового потока в общий ТП составляет от 60% до 90%.

Геотермическая модель. По распределению теплового потока, коэффициента теплопроводности пород, радиогенной теплогенерации рассчитано поле глубинных температур земной коры Северного Тянь-Шаня (рис.4). Структура теплового поля изучалась разделением расчетных температур на стационарную (линейную) и аномальную части. Аномальные (избыточные) температуры определены вычитанием из расчетного поля стационарной составляющей, соответствующей линейному геотермическому градиенту 12 °С/км.

Отмечается линейное понижение температур с юга на север от горных сооружений к платформенной части территории. Горизонтальные градиенты изменения температур уменьшаются от 1.5 °С/км для горных хребтов до 0.5 °С/км в этом направлении. Абсолютная температура составляет 600÷800 °С на глубине 40 км, 850÷1050 °С – на глубине 80 км и 1200 °С – на глубине 100 км. В интервале глубин от 20 км до 45 км определена температурная аномалия с повышенными значениями избыточных температур до 250 °С относительно линейного распределения. В плане аномалия вытянута в субширотном направлении непосредственно над границей М.

Термоупругие напряжения. Действующее давление рассчитано как сумма литостатического давления, обусловленного массой вышележащих горных пород, и термоупругих напряжений, вследствие неравномерного нагрева и неоднородности физико-механических свойств (уравнение 5).

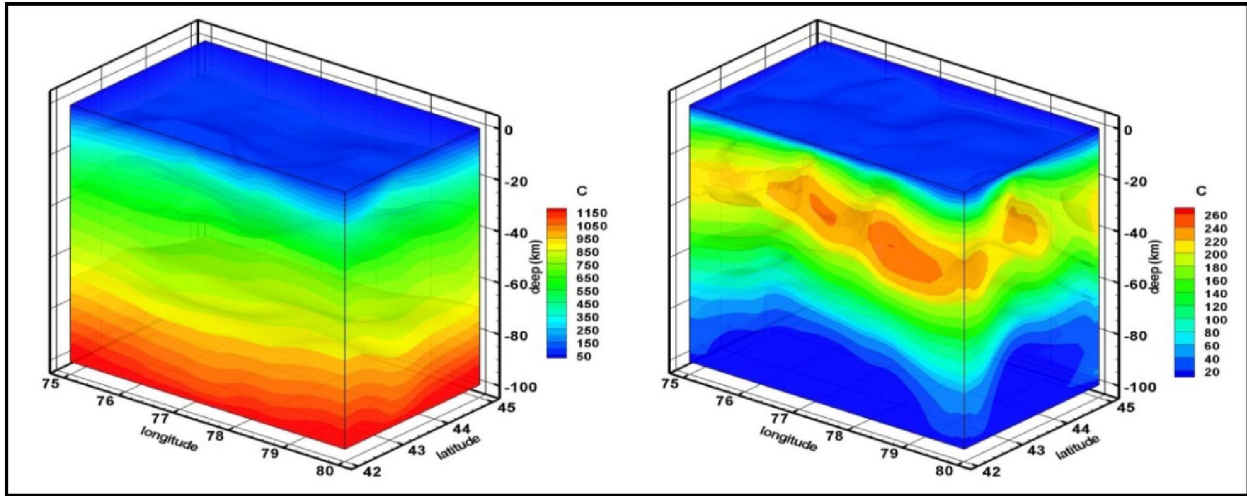


Рисунок 4 – Распределение температур в земной коре Северного Тянь-Шаня по данным моделирования. слева – суммарное поле температур (°C), справа – аномальные (избыточные) температур (°C)

На глубинах от 30÷50 км вклад температурных напряжений составляет 12%÷27% от литостатического давления и достигает 0.45 ГПа (рис. 5). Коэффициент отношения полного давления (с учетом термобарического) к литостатическому в области аномальных температур равен 1.3-1.4.

Расчеты находятся в интервале величин экспериментальных данных по минеральным равновесиям, показывающих, что тектоническое давление может достигать до 100% от литостатического и величин первых гигапаскалей [14].

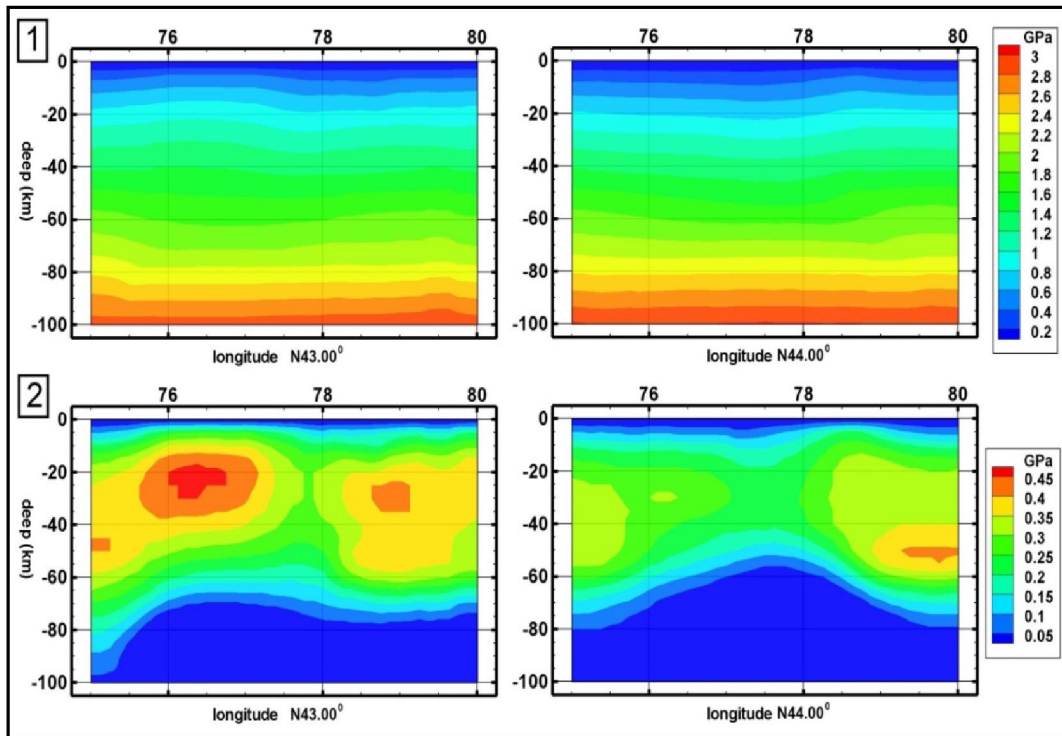


Рисунок 5 – Распределение термонапряжений с глубиной на пироте N43⁰ и N44⁰
 1 – суммарное литостатическое давление и термонапряжения; 2 – термонапряжения

Сопоставление геотермических построений с сейсмическим режимом. Сейсмогенная зона Северного Тянь-Шаня характеризуется сейсмоактивным слоем мощностью до 35 км [6,19,15] Нижняя часть коры практически не содержит очагов землетрясений. Морфология изотермы избыточных температур 230 °С в области аномального разогрева горных пород и изобарическая поверхность термоупругих напряжений интенсивностью 0.35GPa могут быть отнесены к критериям контролирующим распределение гипоцентров землетрясений в объеме земной коры (рис. 5)

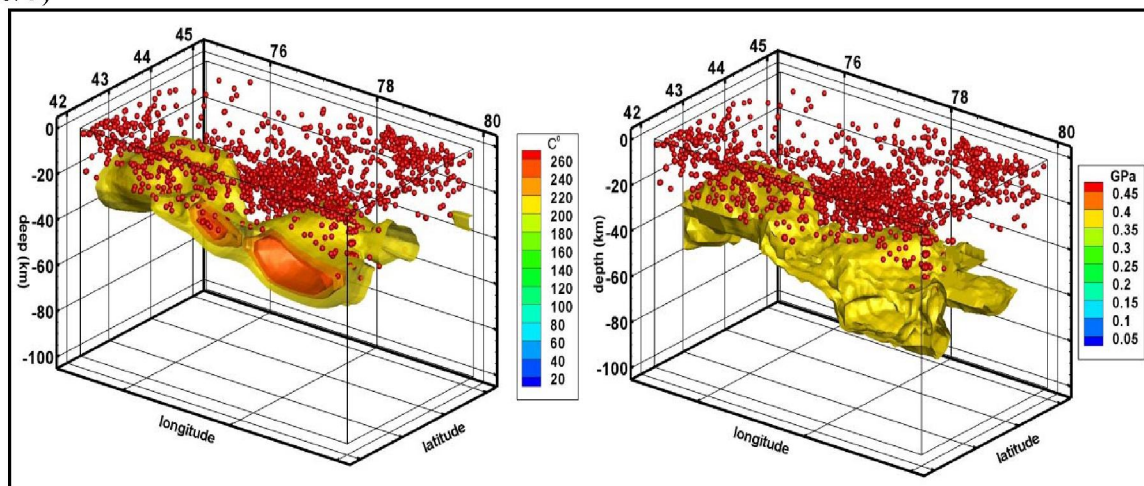


Рисунок 6 – Изотермическая поверхность аномальных температур 230 °С (слева) и изобарическая поверхность термонапряжений 0.35 GPa (справа), контролирующие распределения гипоцентров землетрясений в земной коре Северного Тянь-Шаня

Сопоставление распределения теплового потока и землетрясений среднего энергетического класса (9.0÷10.5) в плане показывает приуроченность эпицентров к областям пониженных значений ТП (рис. 6). Повышенная плотность эпицентров здесь возможно обусловлена пониженными вязкостными свойствами земной коры и повышенной хрупкостью горных пород. Можно предположить хрупкий механизм формирования землетрясений за счет снижения предела пластичности материала коры [16-18] Вопрос требует дополнительного изучения.

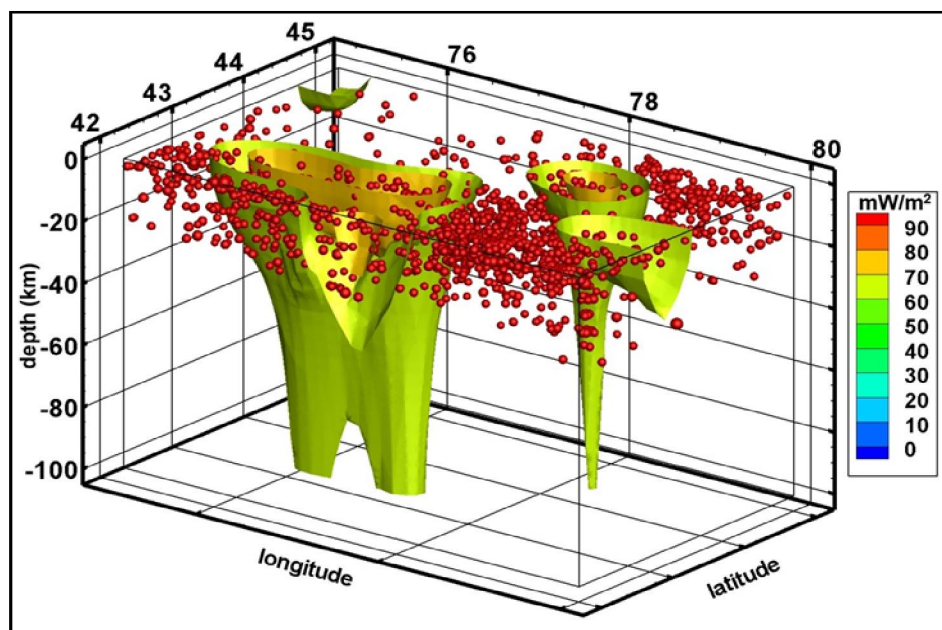


Рисунок 7 – Модель теплового потока Северного Тянь-Шаня с гипоцентрами землетрясений

Однако, катастрофические землетрясения прошлого века (Верненское, $M_s=7.1$, 1887г.; Чиликское, $M_s=8.1$, 1889г.; Кеминское, $M_s=8.0$, 1911г.) произошли в областях с повышенными значениями теплового потока. Авторы предполагают в этих областях наличие фазовых превращений эцлогит-базальт под воздействием высокотемпературных флюидов (более $650\text{ }^{\circ}\text{C}$). Указанные температуры достигаются на глубинах 35-60 км. В областях плавления увеличивается объем пород и уменьшается их плотность и, как следствие, над зоной плавления активизируются вертикальные движения в пределах земной коры. Происходит рост гор вверх за счет увеличения объема и рост "корней" гор вниз за счет выплавления базальтов [19,20] Формируются условия для катастрофических землетрясений.

Заключение.

Геотермическое моделирование позволяет сделать вывод о преобладающем влиянии температурных условий на развитие сейсмического процесса в континентальных условиях. Определяющим является наличие высокотемпературных областей с избыточными температурами на $100\div 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше солидуса, что может привести к частичному плавлению горных пород.

Накопление термоупругих напряжений в земной коре может рассматриваться в качестве одного из критериев наблюдаемой в Северном Тянь-Шане сейсмической активности. Распределение гипоцентров землетрясений среднего энергетического класса контролируется областью избыточных температур до $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ и изобарой термонапряжений менее 0.35 ГПа

Сочетание численного моделирования температурного режима земной коры Северного Тянь-Шаня и сейсмических данных даст дополнительную информацию для прогнозных заключений о возможных механизмах и физических параметрах сейсмоактивной среды региона.

Работа выполнена в рамках проекта «Математическое моделирование воздействия термоупругих деформаций земной коры Северного Тянь-Шаня на формирование сейсмической активности с использованием геоинформационных спутниковых технологий» по бюджетной программе 055 «Научная и (или) научно-техническая деятельность», подпрограмма 101 «Грантовое финансирование научных исследований»

ЛИТЕРАТУРА

- [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] Vincenzo P., Massimo V., Paolo Ch. Geothermics. Heat Flow in the Lithosphere // University of Genova, Springer, 2014, 127p.
- [3] Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. - М.: Наука, 1989. - 432 с.
- [4] Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепломассобмена. - М.: Наука, 1984. -288 с.
- [5] J.C. Jaeger, N.G.W. Cook, and R.W. Zimmerman Fundamentals of rock mechanics—4th ed, 2007. – 475 p.
- [6] Тимуш А.В. Сейсмоструктура литосферы Казахстана – Алматы, 2011, 590с.
- [7] Сейсмическое районирование Республики Казахстан. - Алматы: Эверо, 2000
- [8] Шапилов В.И., Сайипбекова А.В. Профильная томография литосферы Тянь-Шаня по материалам региональной сейсмологии // Доклады НАН РК. – 1994. – № 6. –С.47-52.
- [9] 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.
- [10] Смыслов А.А., Моисеенко У.И., Чадович Т.З. Тепловой режим и радиоактивность Земли. - Л.: Недра, –1979. – 190с.
- [11] Гордиенко В.В., Завгородняя О.В., Якоби Н.М. Тепловой поток континентов. - Киев: Наукова думка, 1982. –184с.
- [12] Davies J.H. Global map of solid Earth surface heat flow// Geochemistry, Geophysics, Geosystems, –2013.–P.14, doi:10.1002/ggge.20271.
- [13] Gosnold W.D., Panda B. The Global Heat Flow Database of The International Heat Flow Commission. –2002. <http://www.und.edu/org/ihfc/index2.html>.
- [14] Pleuger, J., and Y. Y. Podladchikov, A purely structural restoration of the NFP20-East cross section and potential tectonic overpressure in the Adula nappe (central Alps), Tectonics, 33, 656–685, doi:10.1002/2013TC003409.
- [15] Садыкова А.Б. Сейсмическая опасность территории Казахстана. –Алматы. 2012, –267 с.
- [16] Burov E. Thermo-Mechanical Models for Coupled Lithosphere-Surface //Processes: Applications to Continental Convergence and Mountain Building Processes New Frontiers in Integrated Solid Earth Sciences / Editors: S. Cloetingh, J. Negendank, Springer Science+Business, Media, 2010. – 424 p.
- [17] Alfonso J.A., Ranalli G., Fernandez M. Thermal expansivity and elastic properties of the lithospheric mantle: Results from mineral physics of composites// Physics of the Earth Planetary Interiors –2005.–Vol. 149. –P. 279-306.

[18] Zang A., Stephansson O. Stress Field of the Earth's Crust // Springer Science, Business Media B.V. –2010. – 322p

[19] А.К. Курскеев «Землетрясения и сейсмическая безопасность Казахстана». Алматы, 2004 «Эверо», 504 с.

[20] 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.

Ж.Ш. Жантаев¹, А.В. Виляев¹, Э.Б. Серикбаева¹

Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы,
Ионосфера институты, Қазақстан Республикасы, Алматы, Каменское плато

СОЛТҮСТІК ТЯНЬ-ШАНЬНІҢ СЕЙСМИКАЛЫҚ ТӘРТІП ЕРЕКШЕЛІГІН БАҒАЛАУДА ГЕОТЕРМИЯЛЫҚ ҮЛГІЛЕУДІ ҚОЛДАНУ

Андатпа. Солтүстік Тянь-Шань аймағының мысалында сейсмикалық белсенділіктің қалыптасуына себебін тигізетін жер қойнауындағы температураның біртексіз таралуының әсері қарастырылған. Жер қыртысының жылулық өріс параметрлері жайындағы мәліметтер жүйелендірілген және жалпыландырылған. Тереңдеген сайын жылуды түрлендіретін элементтердің таралу заңдылығы анықталып, 3D көлемдік геотермиялық үлгілері тұрғызылды. Сейсмикалық белсенділігі байқалған геотермиялық үлгінің салыстырмалы талдауы орындалды.

Радиогендік жылудың қосымша көздерін ескере отырып сонымен қатар бастапқы және шектес жағдайларымен кондуктивтік жылу тасымалдаудың үшөлшемді тендеуі сандық әдіспен шешілді. Беттегі жылулық өріс ұңғымада өлшенген жергілікті мәліметтер бойынша анықталды. Тау жыныстарының петрологиялық құрамына, температурасына қысымына және жылулық өткізгіш коэффициентіне байланысты, кимадағы кума толқынның таралу жылдамдығының таралу ақпараты ескерілген.

Солтүстік Тянь-Шань тауларының 35-60 км тереңдігінде солидустан жоғары 100÷250 °С температурада тау жыныстарының кейбір бөліктерінің балқуы ерекшеленген.

Тау жыныстарының критикалық тұтқырлығы шыдамайтын, изотерма бойынша аномалдық температурасы 230 °С болатын және изобарада термикалық-кернеулік қарқындылығы 0.35 GPa болатын температурасы жоғары аймақ қоршалды. Аномалды аймақта термикалық кернеуліктің максималдық мәні 0.48 GPa тең, ол литостатикалық қысымның 25÷30% құрайды. Өткен ғасырдың апаттық жерсілкіністері (Верненское M=7.1, Кеминское M=8.0) мантиялық жылудың максималды таралу аумағында орын алды.

Сейсмикалық үдерістің қалыптасуы үшін температуралық жағдайдың әсерінің басымдылығына қорытынды жасалды.

Түйін сөздер: температура, жылулық өріс, термикалық кернеулік, жер қыртысы, сейсмикалық, математикалық үлгілеу.

Сведения об авторах:

Жантаев Ж.Ш. - д.ф.м.н., член-корр. НАН РК, ДТОО «Институт ионосферы», г.Алматы, Казахстан, Адрес: 050020, Алматы, Каменское плато, Служ. тел. 380-30-54;

Виляев А.В. - к.г.м.н., ДТОО «Институт ионосферы», г.Алматы, Казахстан, Адрес: 050020, Алматы, Каменское плато, Служ. тел. 385-09-68; e-mail: vilayev@gmail.com

Серикбаева Э.Б. - научный сотрудник, ДТОО «Институт ионосферы», г.Алматы, Казахстан, Адрес: 050020, Алматы, Каменское плато, Служ. тел. 385-09-68; e-mail: elya_sb@inbox.ru