

Д. Е. Аюнов¹✉, А. Д. Дучков¹

Тепловой поток и температура земной коры Алтае-Саянской складчатой области

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ayunovde@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В статье представлены результаты экстраполяции температуры в верхней части земной коры Алтае-Саянской складчатой области на глубину 5, 10 и 30 км. При расчетах использован уточненный массив значений теплового потока и специальная корреляционная методика оценки глубинных температур. Представлены карта теплового потока региона и три карты распределения температур на разных глубинах земной коры. Кратко описаны основные особенности температурных карт.

Ключевые слова: Алтае-Саянская складчатая область, тепловой поток, глубинные температуры земной коры

D. E. Ayunov¹✉, A. D. Duchkov¹

Heat flow and the Earth's crust temperatures of the Altai-Sayan region

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: ayunovde@ipgg.sbras.ru

Abstract. The article presents the results of extrapolation of temperature in the upper part of the Earth's crust of the Altai-Sayan region to a depth of 5, 10 and 30 km. The calculations used a refined array of heat flow values and a special correlation technique for estimating deep temperatures. Three maps of the temperature distribution at different depths of the earth's crust and a corrected map of the heat flow of the region are presented. The main features of the temperature maps are briefly described.

Keywords: Altai-Sayan region, heat flow, deep temperatures of the Earth's crust

Введение

Значительное место в геотермических исследованиях занимает построение тепловых моделей земной коры с целью оценки глубинных температур [1, 2 и др.]. Метод основан на решении уравнения теплопроводности для физической модели земной коры с заданными граничными условиями. Теоретические оценки [3] показали, что в большинстве континентальных регионов современное температурное поле земной коры (до глубин 50-70 км) хорошо описывается стационарным уравнением теплопроводности. Для построения физической модели коры необходимо знать строение земной коры, поверхностный тепловой поток (q), пространственное распределение источников тепла (радиоактивных элементов) в земной коре и изменение теплопроводности (λ) пород с глубиной. После построения модели земной коры расчет температур (T) сводится к решению

стационарного уравнения теплопроводности. Данные о распределении q используются в качестве одного из граничных условий, другим является поверхностная температура обычно принимаемая равной 0. Наиболее достоверные тепловые модели земной коры создаются вдоль профилей ГСЗ, если по этим же профилям определены необходимые геотермические параметры: q , λ и интенсивность радиогенной теплогенерации (A).

Методика оценки глубинных температур

В Алтае-Саянском регионе измерения геотермических параметров велись не по профилям ГСЗ, а по отдельным скважинам, крайне неравномерно распределенным по огромной площади. В этой ситуации для оценки глубинных температур в земной коре была разработана другая методика, описанная в работе [1]. Первоначально авторами методики были построены тепловые модели (термограммы до глубины 50 км) для нескольких десятков наиболее изученных пунктов в различных регионах юга Сибири. Во всех этих моделях земная кора представлялась состоящей из осадочного, гранитно-метаморфического и базальтового слоев, мощности которых изменялись в пределах 0-6 км, 10-22 км, 15-30 км соответственно. Мощность земной коры изменялась от 35 до 45 км, а тепловой поток - от 20 до 140 мВт/м².

Расчеты глубинных температур проводились как для случая постоянной теплопроводности пород в каждом слое земной коры, так и с учетом ее зависимости от T . Среднее λ основных типов магматических, метаморфических и осадочно-вулканогенных пород региона колеблется незначительно – 2,1-2,5 Вт/(м К). Теплопроводность осадочных пород изменяется в более широких пределах – 1,3-3,8 Вт/(м К). Интенсивность генерации радиогенного тепла (A) в каждом слое земной коры принималась постоянной и определялась по имеющимся сведениям о содержании в породах радиоактивных элементов. Величина A изменялась в указанных слоях земной коры в пределах 1,26-1,42; 1,05-3,56 и 0,46 мкВт/м³, соответственно.

Результаты расчетов анализировались с целью выяснения влияния параметров моделей (колебания мощностей слоев земной коры, значений A , λ , q) на оценки T в земной коре. В итоге было установлено, что наиболее существенно во всех случаях влияние теплового потока. Для T менее 800-900⁰С и фиксированной глубины (H) оно является определяющим. В этом случае между величинами q и расчетными T для конкретной H устанавливается четкая линейная зависимость вида:

$$T = m_1 \cdot q - m_2. \quad (1)$$

Полученные материалы позволили построить графики зависимости расчетной температуры земной коры региона на разных глубинах (5, 10, 20, 30 км) от величины теплового потока [1]:

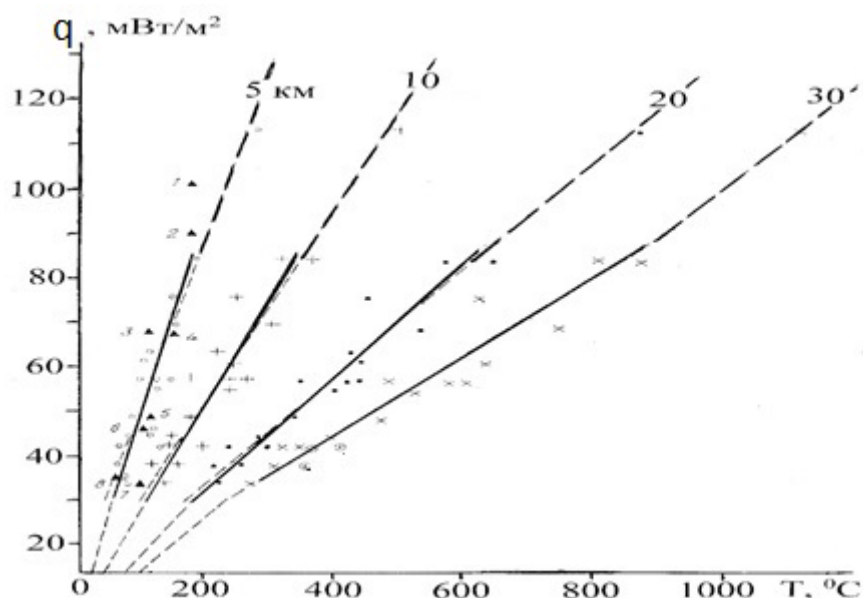


Рис. 1. Экстраполяция температуры в земной коре АССО на разную глубину в зависимости от величины теплового потока [1]. Черные треугольники – температуры измерены непосредственно в скважинах глубиной 5 км, пробуренных в Фергане, Индоло-Кубанском прогибе, Прикаспийской низменности, Апшеронском и Кольском полуостровах.

В Таблице 1 приведены статистические параметры установленных корреляционных зависимостей (1) для разных глубин: значения коэффициентов m_1 и m_2 , коэффициента корреляции r и среднеквадратичного отклонения δ для центральных частей регрессионных зависимостей.

Таблица 1. Статистические параметры корреляционных зависимостей $T = m_1 \cdot q - m_2$ для разных глубин (Н) земной коры АССО [1].

Н, км	m_1 , $^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2/\text{мВт}$	m_2 , $^{\circ}\text{C}$	r	δ , $^{\circ}\text{C}$
5	2,58	23	0,97	20
10	4,65	39	0,98	25
20	7,64	42	0,96	35
30	11,05	95	0,97	45

В работе [1] выявленные корреляционные зависимости было предложено использовать для оценки глубинных температур в земной коре по измеренным значениям теплового потока. Там же приведены примеры проверки достоверности этой методики путем сопоставления расчетных значений T с измеренными на той же глубине в разных регионах страны (пока такие сопоставления возможны лишь до глубин 5-10 км). В большинстве случаев расхождения между измеренными и рассчитанными значениями T не превышали заметно значений $\delta = 20\text{-}25^{\circ}\text{C}$, указанных в

Таблице 1. В работе [1] выявленные корреляционные зависимости применялись для оценки распределения температуры у подошвы земной коры территории Сибири. Позднее по этой методике оценивались глубинные температуры в разных работах [4, 5 и др.]

В настоящей статье описанная выше методика применена для оценки температуры пород земной коры АССО на глубинах 5, 10, 30 км. Расчеты T выполнялись по формуле (1), с учетом значение теплового потока и сведений о коэффициентах m_1 и m_2 (Таблица 1).

С 1960 годов до настоящего времени оценки теплового потока проведены в пределах 40 геологических структур АССО на 147 участках (по измерениям температуры в 312 скважинах и изотопов гелия в газах 28 термоминеральных источников). Сведения о значениях теплового потока включены в Геотермический атлас [6]. Всего при проведении расчетов T учтено 216 значений теплового потока, измеренного на территории АССО и примыкающих регионов.

В настоящей работе на рис. 2 приводим исправленный вариант карты теплового потока АССО, ранее опубликованной в работе [7], в которой содержалась ошибка в данных.

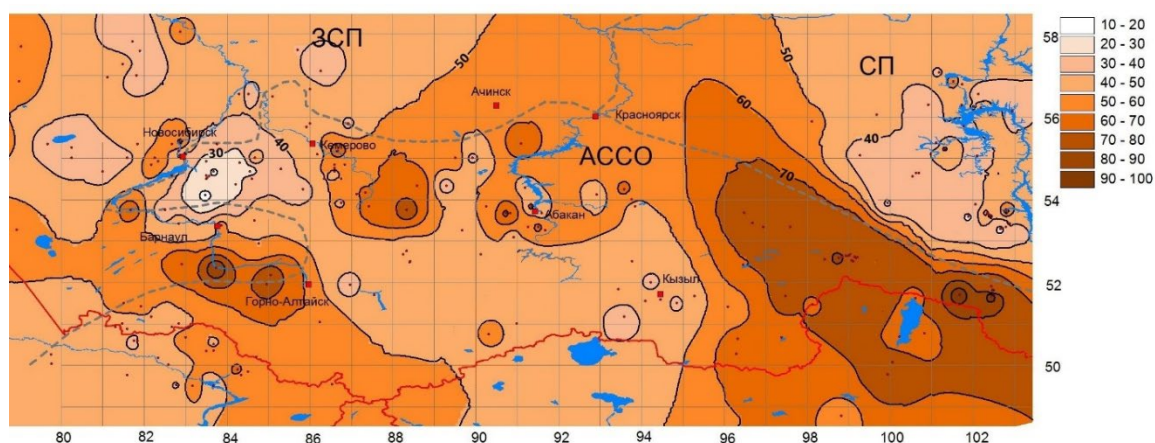


Рис. 2. Тепловой поток Алтае-Саянской складчатой области (исправленный вариант относительно ранее опубликованной карты в работе [7]).

Легенды – плотность теплового потока, мВт/м^2 ; основные изолинии пунктирная линия – граница сочленения АССО с Западно-Сибирской плитой (ЗСП) и Сибирской платформой (СП); красная сплошная линия – государственная граница РФ с Казахстаном, Китаем и Монголией; красные точки – геотермические пункты.

Краткий анализ распределений температур

Массив расчетных температур собран в таблице, которая хранится в архиве лаборатории №563 ИНГГ. В настоящей статье этот массив визуализирован в виде гистограмм (Рис. 3) и электронных температурных карт (Рис. 4) для глубин 5, 10 и 30 км.

Для упрощения дальнейшего изложения введем новые обозначения температур на глубине 5, 10 и 30 км – T_5 , T_{10} , T_{30} .

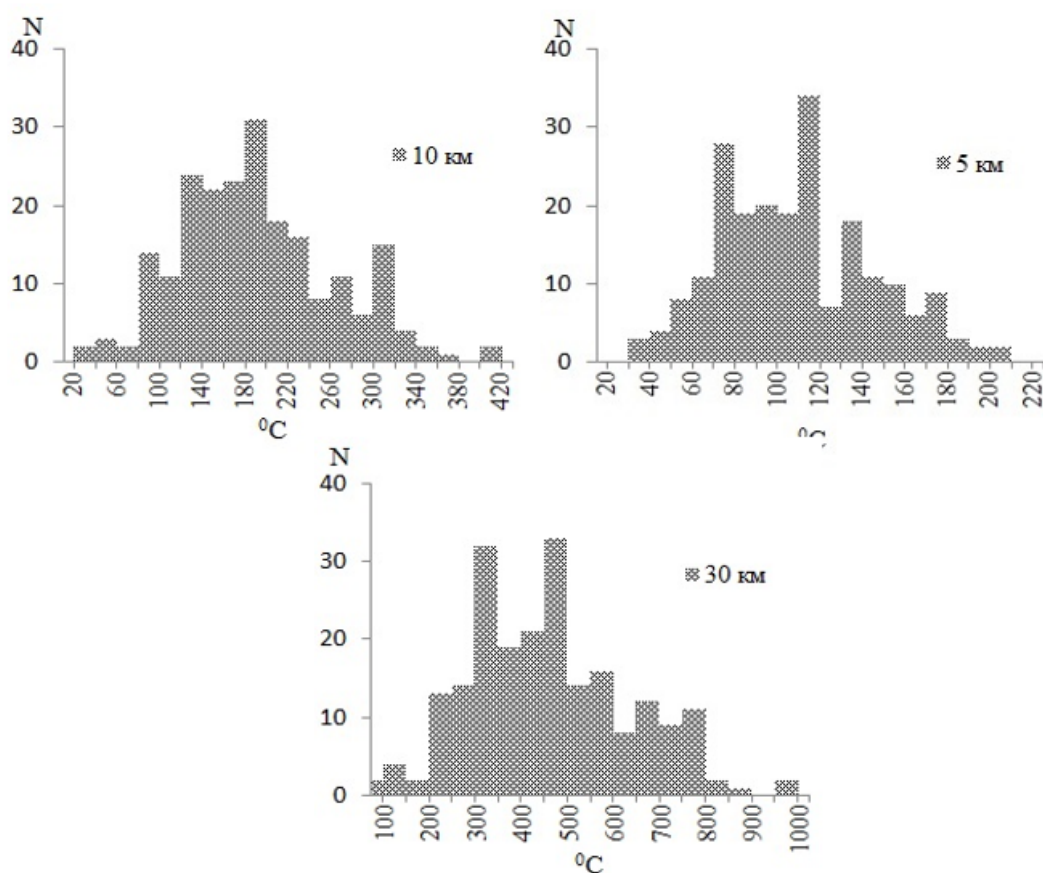


Рис. 3. Гистограммы оценок температуры земной коры АССО на глубинах 5, 10 и 30 км.

Гистограммы имеют форму близкую к симметричной, несколько растянуты в сторону более высоких значений T . Анализ гистограмм показывает, что в пределах изученного региона температура пород изменяется следующим образом: T_5 - от 30 до 210 °C (среднее значение $T_5 = 110$ °C), T_{10} - от 40 до 420 °C (среднее значение $T_{10} = 190$ °C), T_{30} - от 100 до 1000 °C (среднее значение $T_{30} = 460$ °C).

При построении карт в изолиниях использовалась интерполяция данных между пунктами методом обратных взвешенных расстояний (IDW).

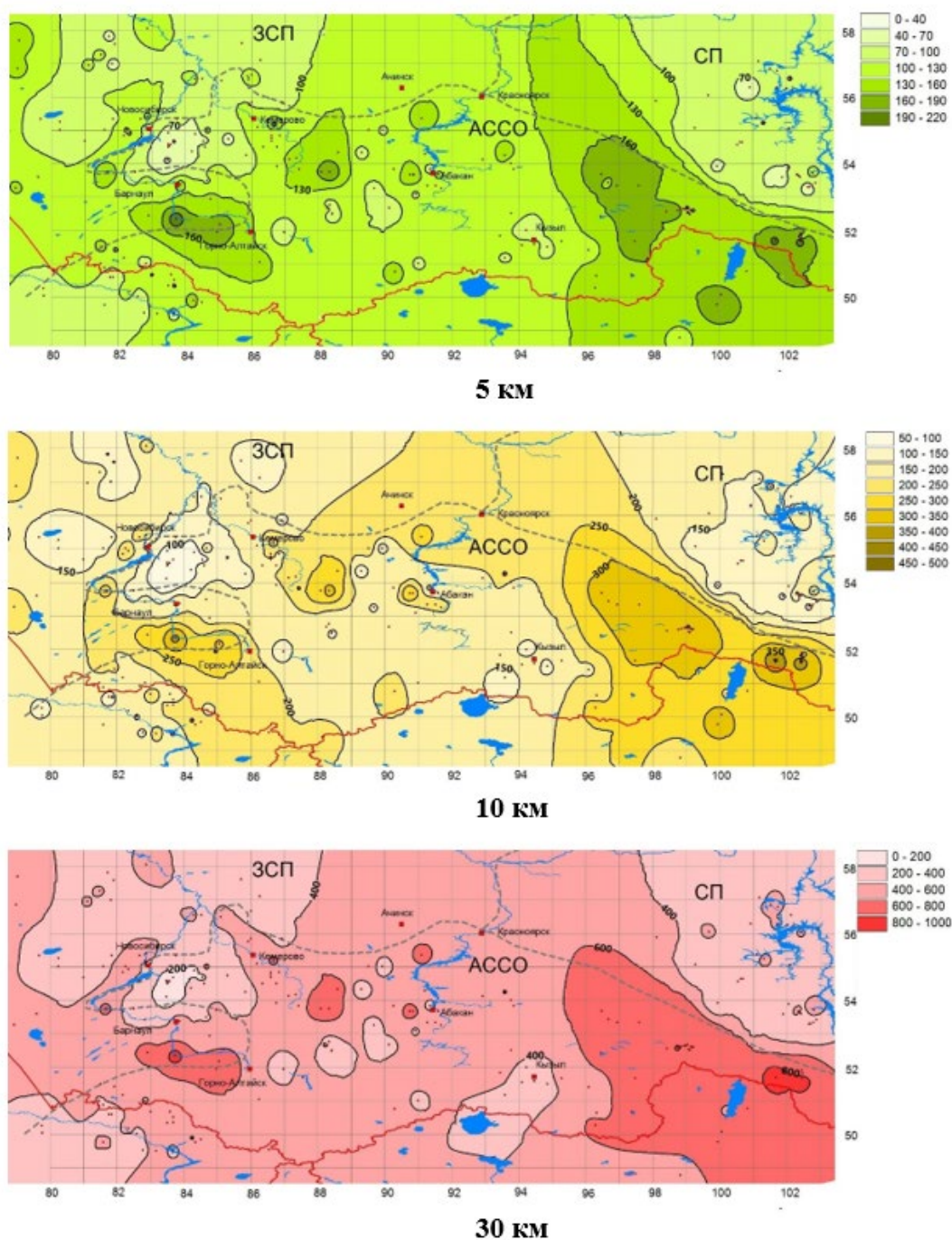


Рис. 4. Оценки температур пород земной коры Алтае-Саянской складчатой области (АССО) на глубине 5, 10 и 30 км.

Легенды – температура, $^{\circ}\text{C}$; основные изолинии пунктирная линия – граница сочленения АССО) с Западно-Сибирской плитой (ЗСП) и Сибирской платформой (СП); красная сплошная линия – государственная граница РФ с Казахстаном, Китаем и Монголией; красные точки – геотермические пункты.

При построении распределений T использовался один и тот же набор значений q , поэтому на всех температурных картах сохраняются некоторые одинаковые особенности теплового поля, которые рассматриваются ниже.

Так, для всех глубин характерно, что районы, отличающиеся высокой температурой пород земной коры, расположены на западе и востоке региона. В то же время центральная часть территории АССО характеризуется стабильным температурным полем: $T_5 = 80-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{10} = 180-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{30} = 500-600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Минимальные значения глубинных температур в пределах АССО зафиксированы только на северо-западе региона, в пределах Салаирского кряжа и Горловского прогиба. Здесь прогнозируются такие температуры пород: T_5 – менее $40-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{10} – менее $100-150\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{30} – менее $200-400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Фактически это наиболее охлажденный блок земной коры региона [1, 4]. В пределах АССО более заметно распространение прогретых блоков земной коры. Так весьма прогретыми в западной части региона представляются юго-восточная часть Кузнецкого прогиба ($T_5 = 100-130\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{10} = 200-230\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{30} – более $600\text{ }^{\circ}\text{C}$) и Бийско-Барнаульская впадина с примыкающими участками Рудного Алтая ($T_5 = 100-160\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{10} = 250-350\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{30} = 600-800\text{ }^{\circ}\text{C}$). Наиболее значительная по площади аномалия высоких глубинных температур (T_5 – более $100-160\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{10} – более $200-300\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{30} – более $600-800\text{ }^{\circ}\text{C}$) выявлена в восточной части АССО (Восточный Саян, Восточно-Тувинский массив), непосредственно примыкающей к Байкальской рифтовой зоне (БРЗ). Аномалия фиксирует распространение на запад рифтогенных и магматических процессов, идущих в земной коре БРЗ. В пределах этой аномалии зафиксированы многочисленные проявления кайнозойского вулканизма и источников термальных вод.

Заключение

Уточненная база данных по тепловому потоку использована для прогностической оценки температуры горных пород в земной коре АССО (на глубине 5, 10 и 30 км). Тепловая модель строилась по ранее выявленной для АССО корреляционной связи между измеренным тепловым потоком и расчетной температурой на определенной глубине [1]. Наиболее охлажденный блок земной коры (T_5 – менее $40-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{30} – менее $200-400\text{ }^{\circ}\text{C}$) выявлен в северо-западной части региона. Наиболее высокие глубинные температуры (T_5 – более $100-160\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{30} – более $600-800\text{ }^{\circ}\text{C}$) фиксируются на востоке АССО. Геотермические измерения выявили здесь значительное распространение на северо-запад горячего астеносферного слоя, наиболее развитого в БРЗ. Основными причинами вариаций глубинных температур являются процессы теплопереноса в осадочных породах, изменения интенсивности генерации радиогенного тепла в породах земной коры, изменения мантийного теплового потока. Естественно, что полученные распределения глубинных температур в недрах АССО нуждаются в проверке или подтверждении другими методами. Для этого необходимо проведение специальных исследований, включающих поиск различий скоростей сейсмических волн и значений электропроводности, оценок расположения изотермы Кюри в блоках земной коры с разной температурной обстановкой. В качестве примера сошлемся на известную статью И.М. Артемьевой [8]. В этой работе получено значительное количество геотермических результатов и в том числе выполнена оценка глубины

расположения нижней границы магнитной коры (изотермы 550⁰С) в пределах континентальной литосферы. Согласно [8] в центральной части АССО эта изотерма располагается на глубине 30 км. Ранее в настоящей статье мы отмечали, что по нашим оценкам в этой части региона на глубине 30 км температура достигает значений 500-600⁰С, что согласуется с результатами Артемьевой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тепловое поле недр Сибири // Отв. редактор Э.Э. Фотиади. Новосибирск: Наука, 1987, 197 с.
2. Геотермические модели геологических структур. Сб. научн. трудов. Спб.: 1991, 185 с.
3. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966, 724 с.
4. Крылов С.В., Дучков А.Д. Глубинное деформационно-прочностное районирование земной коры (на примере Алтае-Саянской и Байкальской сейсмических областей) // Геология и геофизика, 1996, №9, 56-65.
5. Дучков А.Д., Соколова Л.С. Оценка термоупругих напряжений в земной коре Восточной Тувы в зоне сейсмической активизации 2011-2012 гг. // Интерэкспо Гео-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 8-18 апреля 2014 г.): Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: Сб. материалов в 4 т. Т. 2 – Новосибирск: СГГА, 2014.- С. 52-57.
6. Дучков А.Д., Железняк М.Н., Аюнов Д.Е., Веселов О.В., Соколова Л.С., Казанцев С.А., Горнов П.Ю., Добрецов Н.Н., Болдырев И.И., Пчельников Д.В., Добрецов А.Н. Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока. (2012). - 2012 [Электронный ресурс]. - URL: <http://sibgeotherm.ipgg.sbras.ru/>
7. Аюнов Д.Е., Дучков А.Д., Казанцев С.А. Уточненная карта теплового потока Алтае-Саянской складчатой области // Интерэкспо Гео-Сибирь. XXI Междунар. науч. конгр. 21-22 мая 2025 г., Новосибирск: Сборник материалов в 8 т. Т. 2: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». Новосибирск: СГУГиТ, 2025. С. 106-112.
8. Artemieva I.M. Global 1⁰x1⁰ thermal model TC1 for the continental lithosphere: Implications for lithosphere secular evolution // Tectonophysics, 2006, V. 416, p. 245-277.

© Д. Е. Аюнов, А. Д. Дучков, 2026