

Д. Е. Аюнов^{1✉}, А. Д. Дучков¹, С. А. Казанцев¹

Уточненная карта теплового потока Алтае-Саянской складчатой области

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

Аннотация. Первая карта теплового потока Алтае-Саянской складчатой области (АССО) была опубликована в 1987 году. Был выполнен анализ опубликованных и лабораторных материалов для выяснения современной геотермической изученности территории региона. За время, прошедшее после построения первой карты теплового потока АССО (более 30 лет), объем геотермической информации по региону существенно увеличился. К 154-м значениям теплового потока добавилось 67 новых изученных участков, значения теплового потока на которых определены геотермическим методом по измерениям в скважинах, а также изотопно-гелиевым методом в термоминеральных источниках. Данная работа предлагает обновленную карту теплового потока АССО с учетом накопившихся за последние десятилетия новых данных.

Ключевые слова: тепловой поток, карта, Алтае-Саянская складчатая область, изотопно-гелиевый метод

D. E. Ayunov^{1✉}, A. D. Duchkov¹, S. A. Kazantsev¹

Updated heat flow map 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 first heat flow map of the Altai-Sayan region was published in 1987. The analysis of published and laboratory materials was carried out to clarify the current geothermal research of the region. Since the construction of the first heat flow map of the region (more than 30 years), the volume of geo-thermal information for the region has increased significantly. 67 new researched sites have been added (to 154 known before), where the heat flow density values were determined by the geothermal method by measurements in wells and by the isotope-helium method in the thermomineral sources. The work offers an updated heat flow map of the Altai-Sayan region, taking into account the new data accumulated over the past decades.

Keywords: heat flow, Altai-Sayan folded region, isotope-helium method

Введение

Внутриземной тепловой поток (q) является важнейшей характеристикой энергетического состояния литосферы. Информация о пространственном распределении q используется для оценки температуры земных недр при тектоническом районировании и интерпретации региональных геофизических материалов.

Измерения температуры (T), геотермического градиента (g) в скважинах Алтае-Саянской складчатой области (АССО), а также теплопроводности (λ) кернов, сотрудники ИГиГ АН СССР (теперь ИНГГ СО РАН) начали в 1960-ых годах. К концу 1980-ых годов уже были накоплены значительные объемы геотермических

данных (значения T , g , λ , q) по скважинам, пробуренным на 80 участках региона. На основании этой информации была построена первая карта теплового потока по АССО [1], см. рис. 1. В качестве геологической основы была использована тектоническая схема АССО из статьи В.А. Кузнецова, опубликованной в 1966 г. [2].

Рис. 1. Карта теплового потока, 1987 г. [1]

Тепловой поток, q , в основном определяется по измерениям геотермического градиента (g) в скважинах и теплопроводности горных пород (λ) из тех же скважин в лабораторных условиях [1]:

Существуют также приближенные способы оценки геотермического градиента по сведениям от геотермометров, о термобарических условиях формирования ксенолитов. Приблизительная оценка теплового потока возможна с помощью изотопно-гелиевого метода (рассмотрен подробнее ниже).

ных источников. Наличие корреляции позволило предложить изотопно-гелиевый метод оценки значений q по формуле (2) [4]:

$$q = 18.23 \cdot \lg R + 181.82 \text{ (мВт/м}^2\text{)}, \quad (2)$$

где $R = {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$, $r = 0,78$ - коэффициент корреляции между параметрами q и R .

Описанная корреляция справедлива для основной части измеряемого диапазона земного теплового потока – от 35-42 до 87-100 мВт/м² [4]. Сопоставление близко расположенных скважинных и изотопно-гелиевых определений q показало их неплохое совпадение (в пределах 10-15%) [4].

Изотопно-гелиевый метод реализуется следующим образом. С помощью специальных приемов отбираются газовые или водные пробы с поверхности газизирующих термоминеральных источников. Затем пробы отправляются в лабораторию, где в них определяются количества стабильных изотопов гелия ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ и рассчитываются отношения R . В нашем случае измерения изотопов производились в основном на масс-спектрометре в лаборатории Института геологии КНЦ РАН (аналитик И.Л. Каменский). Полученные таким образом значения R используются для определения значений q по формуле (2).

В целом за последние более чем 30 лет добавилось 67 новых изученных участков, в пределах которых значения q определены геотермическим методом по 72 скважинам [5,6,8] и изотопно-гелиевым методом по 28 термоминеральным источникам [7,9,10]. Новые материалы включены в «Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока» [11], который на данный момент представляет собой наиболее полную базу данных по тепловому потоку регионов Сибири и Дальнего востока, включая северные районы Казахстана, прилегающие арктические и восточные моря. В 2024 году атлас был реализован в современной российской ГИС NextGIS (рис. 2).

С учетом этой новой информации можно отметить, что с 1960-ых годов до настоящего времени оценки q проведены в пределах 40 геологических структур АССО на 147 участках (изучено 312 скважин и 28 термоминеральных источников). Вся накопленная информация использована авторами отчета для построения новой карты теплового потока АССО, занимающей территорию, ограниченной координатами 57-48° с.ш. (отчасти включая северные территории Казахстана и Монголии) и 80-102° в.д. При построении карты использованы геотермические данные по окружающим АССО территориям из «Геотермического атласа Сибири и Дальнего Востока» [11].

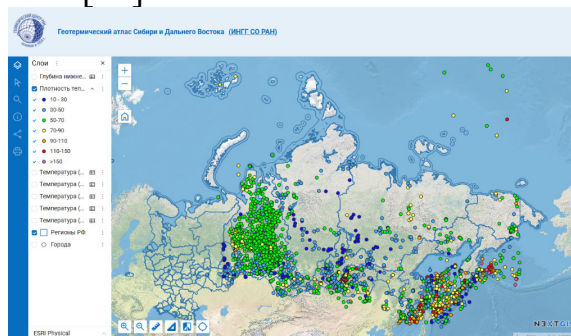


Рис.2. Общедоступная онлайн-версия Геотермического атласа Сибири и Дальнего Востока (<http://sibgeotherm.ipgg.sbras.ru>)

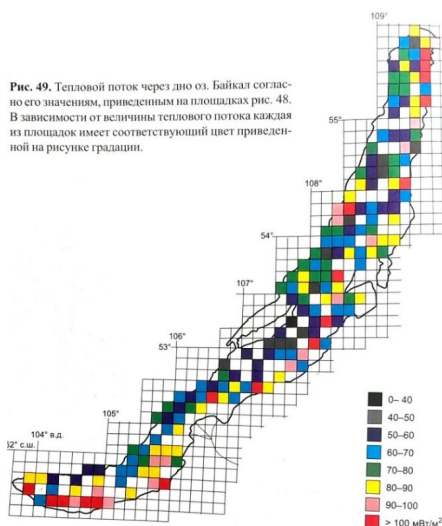


Рис.3. Пример представления карты теплового потока посредством усреднения данных по площадкам [12]

Необходимо отметить, что при построении карт теплового потока существует по крайней мере три способа представления q : 1) точечный (см. рис. 2), 2) в «изолиниях» и 3) способ, не редкий в отечественной геотермии, в котором – в силу специфики самих геотермических данных – территория разбивается на площадки, для каждой из которых рассчитывается усредненное значение q , и таким образом карта представляется в виде «лоскутного одеяла» (см. пример на рис. 3). Однако для представления теплового потока АССО было отдано предпочтение второму способу, с помощью изолиний.

Результаты

Новая карта теплового потока построена по 221 пункту определения q по сравнению с 154 пунктами, на основе которых построена карта 1987 г. При построении карты теплового потока в изолиниях в качестве опорной использовалась карта, в которой интерполяция данных между пунктами определения q осуществлялась машинным способом, методом обратных взвешенных расстояний (IDW) (рис. 4).

Область АССО покрыта сетью пунктов не равномерно, поэтому для интерполяции значения q использовалось комплексирование с данными тектоники региона. В районах, где отсутствуют измерения q или имеют место единичные измерения, интерполяция осуществлялась с опорой на характер простиранения тектонических блоков с допущением того, что блок в своих пределах характеризуется близкими значениями q . Итоговая карта теплового потока АССО представлена на рис. 5 в двух вариантах. На рис. 5.А карта выполнена в изолиниях, проведенных через 20 мВт/м². Такое построение пригодно для общей характеристики теплового потока в регионе. На рис. 5.Б изолинии проведены через 10 мВт/м². Данная карта позволяет различать локальные особенности теплового поля.

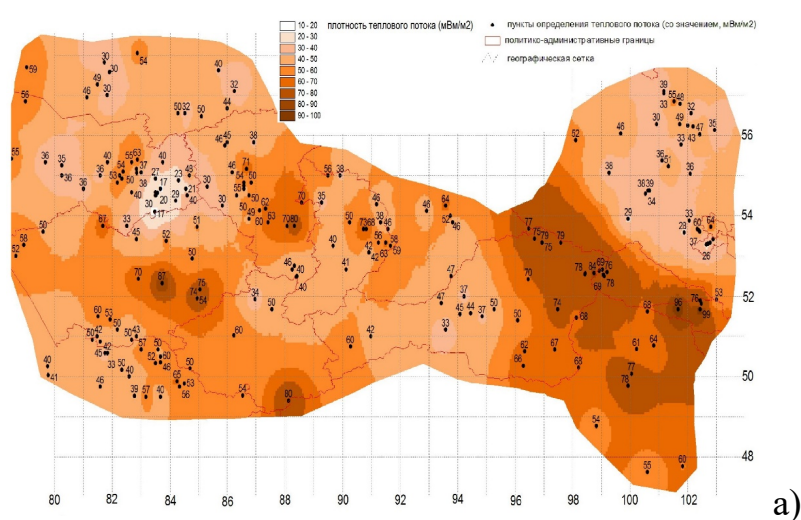


Рис. 4. Опорная карта для создания карты теплового потока АССО, построенная интерполяцией методом обратных взвешенных расстояний (IDW)

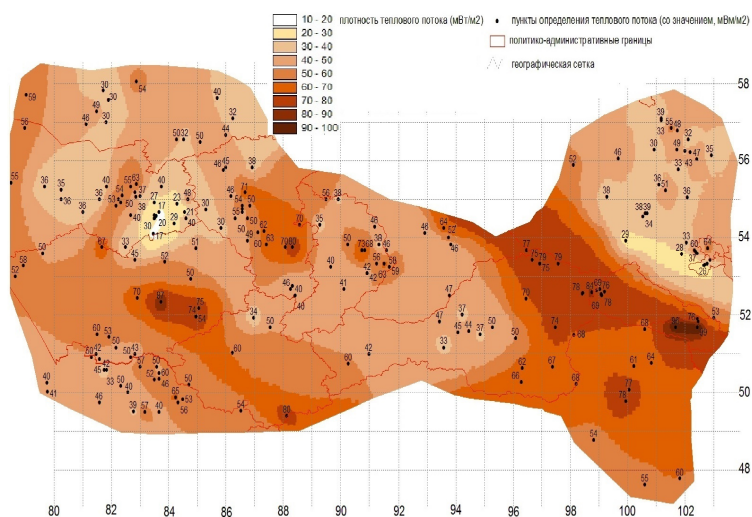
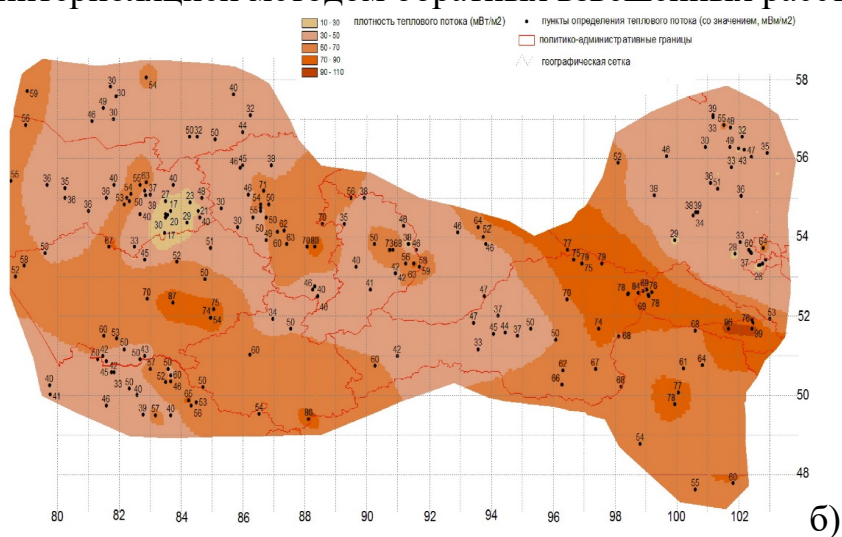


Рис. 5. Новая карта теплового потока Алтае-Саянской складчатой области, 2024 г. А – изолинии проведены через 20 мВт/м²; Б – изолинии проведены через 10 мВт/м²

Обсуждение

Новые карты теплового потока Алтае-Саянской складчатой области (рис. 4-5) показали, что весьма существенной деталью в распределении q является значительная по масштабу аномалия высокого q (порядка 70-90 мВт/м²) в юго-восточной части АССО (Восточный Саян, Восточно-Тувинский массив), непосредственно примыкающей к Байкальской рифтовой зоне (БРЗ). Новые данные позволили более четко оконтурить границы этой аномалии, свидетельствующей о распространении на северо-запад рифтогенных и магматических процессов, развивающихся в недрах БРЗ, вдоль границы АССО с Сибирским кратоном. Тепловой поток в пределах этой аномалии определяется в основном аномальной мантийной составляющей. Можно подчеркнуть, что геотермические измерения картируют распространение на северо-запад горячего астеносферного слоя, наиболее развитого в недрах БРЗ. В пределах выделенной аномалии теплового потока зафиксированы многочисленные проявления кайнозойского вулканизма и источников термальных вод.

Остальная (большая) часть территории АССО характеризуется сравнительно невысоким тепловым потоком, порядка 40-60 мВт/м² (в среднем 54 мВт/м²). Такой средний уровень q присущ геологическим структурам каледонского и герцинского возраста [13], которые и составляют основную часть региона. Данное геотермическое наблюдение фактически подтверждает важный вывод о том, что кайнозойская структура АССО, в отличие от Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), сформировалась в результате передачи деформаций от Индо-Евразийской коллизии (т.е. в результате «холодной» перестройки).

Минимальные значения q зафиксированы на северо-западе области в пределах Салаирского кряжа и Горловского прогиба. Здесь на сравнительно небольшой территории q снижается до 17-30 мВт/м² (среднее значение 24 мВт/м²). Низкий q обычно выделяет блоки литосферы, охлажденные вследствие регионального уменьшения мантийной составляющей q или из-за снижения интенсивности радиогенного тепловыделения (A) в верхнем слое земной коры (известно, что в породах Салаира A в два раза ниже, чем в соседних районах).

Более характерны для АССО значения теплового потока, достигающие или превышающие средний уровень q . Так, весьма прогретой представляется юго-восточная часть Кузнецкого прогиба, где на некоторых участках q достигает 60-80 мВт/м². Повышен тепловой поток и в Бийско-Барнаульской впадине. Аномалии q в прогибах могут быть связаны с процессами теплопереноса в осадочном чехле впадин, а также с влиянием погребенных гранитных массивов. Повышенным q (55-65 мВт/м²) характеризуется Томь-Колыванская складчатая зона, насыщенная высокорadioактивными гранитными батолитами пермского возраста (Новосибирский, Барлакский и другие батолиты). Известно, что значения радиогенной теплогенерации в пермских гранитах в 4 раза превышают A во вмещающих породах. Сравнительно детально изучен q в пределах Рудного Алтая. Здесь он повышается лишь на нескольких участках до 60 мВт/м².

Заключение

Количество геотермических данных по АССО с момента построения последней карты теплового потока [1] увеличилась более чем на 40 %: с 154 пунктов определения q до 22. Это вызвало необходимость обобщить материалы и построить обновленную карту теплового потока региона, которая представлена в данной работе. Кроме того, создана карта теплового потока АССО с шагом изолиний 10 мВт/м^2 , что позволяет различать более локальные особенности распределения теплового потока.

Благодарности

Авторы выражают благодарность ГЦ РАН, совместно с которым в 2024 году «Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока» был реализован в новой общедоступной онлайн-версии [11].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тепловое поле недр Сибири. Ред. Э.Э. Фотиади. Новосибирск: Наука, 1987, 197 с.
2. Кузнецов В.А. Геотектоническое районирование Алтае-Саянской складчатой области // Основы формационного анализа эндогенной металлогении Алтае-Саянской области. – Новосибирск: Наука. 1966.- С. 16-26.
3. Поляк Б.Г., Толстихин И.Н., Якуцени В.П. Изотопный состав гелия и тепловой поток — геохимический и геофизический аспекты тектогенеза // Геотектоника, 1979, № 5, с. 1-25.
4. Поляк Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. М.: Наука, 1988, 192 с.
5. Хуторской М.Д. Геотермия Центрально-Азиатского складчатого пояса. Москва: Изд-во РУДН, 1996, 289 с.
6. Соколова Л.С., Дучков А.Д. Новые данные о тепловом потоке Алтае-Саянской области // Геология и геофизика, 2008, т. 49, №12, с. 1248-1261.
7. Дучков А.Д., Рычкова К.М., Лебедев В.И., Каменский И.Л., Соколова Л.С. Оценки теплового потока Тувы по данным об изотопах гелия в термоминеральных источниках // Геология и геофизика, 2010, т. 51, №2, с. 264-276.
8. Дучков А.Д., Рычкова К.М., Аюнов Д.Е. Тепловой поток Центрально-Тувинской котловины // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Эколого-экономические проблемы природопользования: Вып. 12. Кызыл: ТуваИКОП СО РАН, 2012, с. 115-120.
9. Бадминов П.С., Иванов А.В., Оргильянов А.И. Окинская гидротермальная система (Восточный Саян) // Вулканонология и сейсмология, 2013, №4, с. 27-39.
10. Рычкова К.М., Аюнова О.Д. Изотопы гелия в подземных водах Тункино-Окинско-Саянской рифтовой зоны (Восточный Саян): корреляция с тепловым потоком // Геология и геофизика, 2019, т. 60, №9, с. 1269-1280.
11. 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/>
12. Голубев В. А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск. Изд-во Гео, 2007, 224 с.
13. Смирнов Я.Б. Связь теплового поля со строением и развитием земной коры и верхней мантии // Геотектоника, 1968, №6, с. 3-25.

© Д. Е. Аюнов, А. Д. Дучков, С. А. Казанцев, 2025