

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ВОЛГО-УРАЛИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ БАЙЕСОВСКОЙ ИНВЕРСИИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

И.Н. Огнев¹, Й. Эббинг², М. Лёзинг², Д.К. Нургалиев¹

¹Казанский федеральный университет, г. Казань, IgNOgnev@kpfu.ru

²Кильский университет имени Кристиана Альбрехта, г. Киль, Германия

Волго-Уралия – это восточный сегмент Восточно-Европейского кратона. В нём расположена Волго-Уральская нефтегазоносная провинция, зрелость нефтематеринских пород, которая тесно связана с распределением температуры в земной коре. Было опубликовано множество данных о тепловом потоке и температуре в пределах данного региона [1-5]. Однако для Волго-Уральского блока земной коры до сих пор не было построено трёхмерной геотермической модели. В данном исследовании представлена новая модель Волго-Уральского геотермического поля, в которой согласуются имеющиеся данные о тепловом потоке и температуре на земной поверхности (рис. 1).

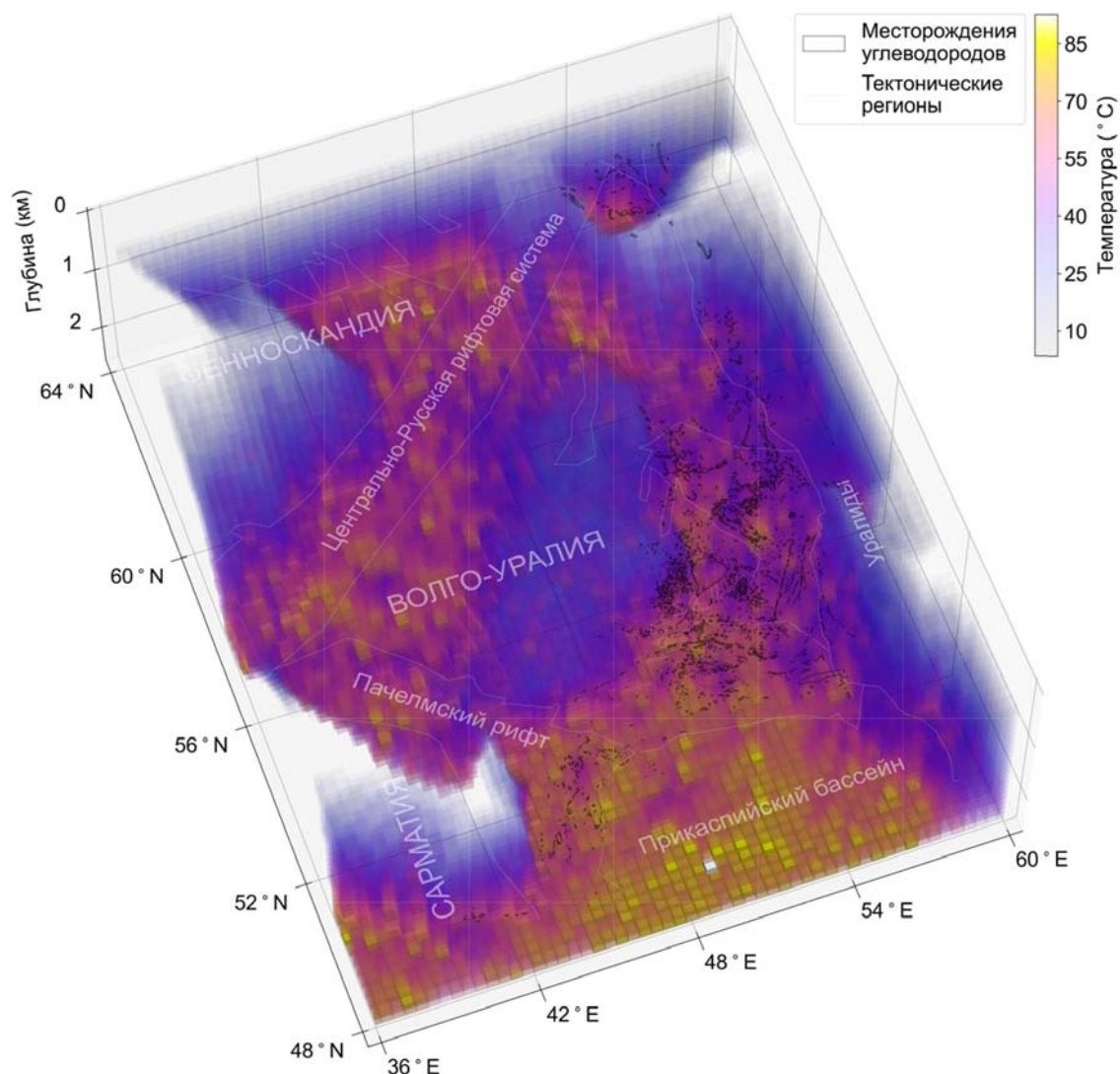


Рис. 1. Трёхмерная воксельная модель температуры осадочного чехла Волго-Уралии. Размеры каждого вокселя составляют ~50 км по горизонтали и 100 м по вертикали. Модель показана для глубин от 500 до 2500 м и срезана по подошве осадочного чехла. Месторождения углеводородов расположены на глубине 1500 м, что соответствует средней отметке водонефтяного контакта крупнейших нефтяных месторождений Волго-Уралии по С.П. Максимова [6].

Основная цель настоящего исследования заключается в изучении латеральных вариаций неизвестных термических параметров в пределах Волго-Уралии. Для этой цели был применен байесовский подход Монте-Карло с цепями Маркова с использованием следующих входных данных: тепловой поток и температура на земной поверхности, температура на границе литосферы и астеносферы и толщины слоев литосферы и земной коры. В результате были получены возможные латеральные вариации теплопроводности и радиогенного теплообразования земной коры, а также теплопроводности и теплового потока верхней мантии (рис. 2). Данная методология была применена для однослойной и многослойной моделей земной коры и полученные геотермические модели были сравнены с существующими измерениями температуры в осадочном чехле региона.

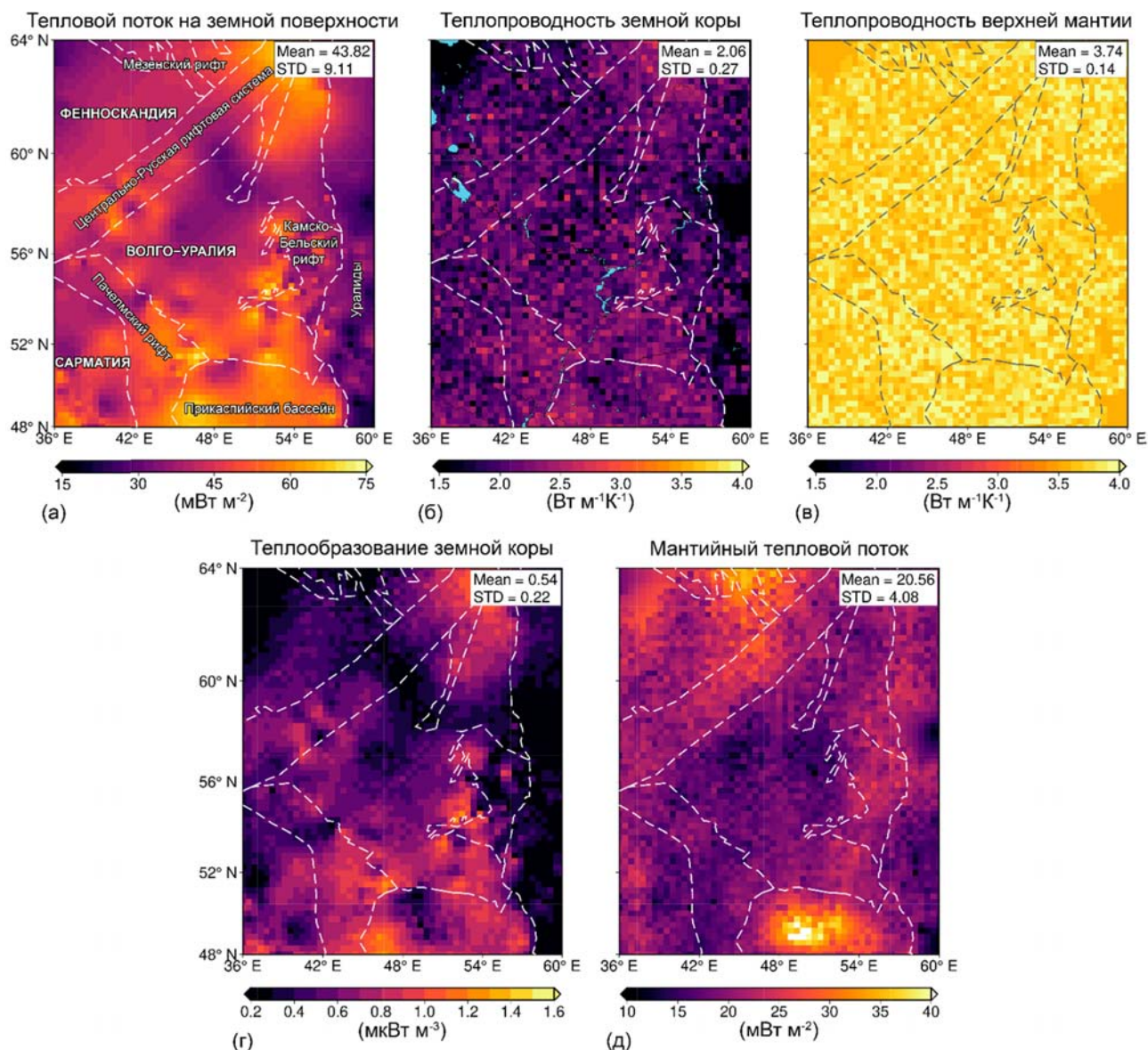


Рис. 2. Вариации тепловых параметров Волго-Уральского сегмента Восточно-Европейского кратона для однослойной модели земной коры: (а) тепловой поток на земной поверхности, (б) теплопроводность земной коры, (в) теплопроводность верхней мантии, (г) радиогенное теплообразование земной коры, (д) мантийный тепловой поток.

Распределение моделируемых термических параметров для однослойной модели земной коры показаны на рис. 2. Как видно из рис. 2 б-в, байесовская инверсия предлагает несколько более высокую изменчивость теплопроводности земной коры со средним значением 2,06 Вт/м/К и стандартным отклонением 0,27 Вт/м/К по сравнению с теплопроводностью верхней мантии, среднее значение которой составило 3,74 Вт/м/К и стандартное отклонение 0,14 Вт/м/К. Это ожидаемый результат, учитывая более узкий допущенный диапазон изменения теплопроводности верхней мантии. Видимые на рис. 2 б вариации теплопроводности земной коры показывают её уменьшение до ~1.5–2.0 Вт/м/К в области Уральских гор и восточной Фенноскандии. Если Урал в целом характеризуется низкими значениями геотермических параметров [7], и ожидаемо имеет относительно низкую теплопроводность, то аномалия в восточной части Фенноскандии не подтверждается более ранними исследованиями. Оба района также характеризуются наименьшими аномалиями теплового потока на земной поверхности (рис. 2 в).

Как видно по рис. 2 г, радиогенное теплообразование земной коры Волго-Уралии сильно варьирует в пределах исследуемого региона. Среднее значение радиогенного теплообразования для моделируемого региона довольно низкое (0,54 мкВт/м³) и находится в пределах типичных значений радиогенного теплообразования для архейской коры, полученных К. Жаупаром и Ж.-К. Марешалем [8]. Радиогенное теплообразование земной коры в пределах кратонной коры Волго-Уралии также имеет низкие значения со средним значением, равным 0,58 мкВт/м³. Однако в восточных и южных районах Волго-Уралии наблюдаются зоны с локальным повышением радиогенного теплообразования, где оно может превышать среднее значение более чем в два раза. Эти повышенные уровни радиогенного теплообразования могут возникать из-за спорадического присутствия кислых гранитоидов и особенно по причине обилия высокоглиноземистых сланцев и гнейсов, которые обнаруживаются в архей-

ских коровых комплексах Волго-Уралии [9-11]. Последние могут показывать повышенное значение радиогенного теплообразования, поскольку оно имеет тенденцию коррелировать с содержанием Al_2O_3 в метаосадочных породах [12].

Ещё одним районом с повышенным радиогенным теплообразованием является Тимано-Печорский осадочный бассейн, протянувшийся вдоль неопротерозойского Тиманского орогена к северу от Волго-Уралии. Одной из причин такой аномалии может быть более молодая радиогенная протерозойская верхняя кора. Другой причиной может служить утонение литосферы, которое могло привести к увеличению мантийного теплового потока и, как следствие, теплового потока на земной поверхности [13]. В этом случае аномалия с повышенным радиогенным теплообразованием будет менее выражена. Однако такое утонение не отражено в модели литосферы И.М. Артемьевой [14], используемой в настоящем исследовании, хотя оно и было предложено ранее в модели TC1 [15].

Отдельно стоит сказать про Прикаспийский бассейн, в пределах которого, по результатам моделирования, радиогенное теплообразование также поднимается выше фоновых значений. Прикаспийский бассейн характеризуется наличием мощных соляных отложений пермского возраста, которые могут приводить к существенным искажениям теплового поля, выраженным в вариациях теплового потока на земной поверхности [16]. Отсюда, интерпретация вариаций теплового потока в данном регионе существенно усложняется, в связи с чем полученные вариации радиогенного теплообразования должны здесь рассматриваться скептически.

Уралиды, северо-западная часть Волго-Уралии и восточная часть Фенноскандии являются районами низкого теплообразования. Уралиды, согласно результатам моделирования, представляют собой район с наименьшим радиогенным теплообразованием земной коры, имеющим на всей своей территории значения в диапазоне $0,2-0,4$ мкВт/м³. Этот результат согласуется с опубликованными низкими значениями измеренного радиогенного теплообразования и тем фактом, что петрологически земная кора под Уральскими горами является более мафической, чем кора Восточно-Европейского кратона [17, 18]. Для северо-западной части Волго-Уралии характерно отсутствие метаосадочных пород с предположительно повышенной радиоактивностью [10]. Низкие значения радиогенного теплообразования в восточной Фенноскандии объясняются низким тепловым потоком на земной поверхности, составляющим ~ 20 мВт/м², зарегистрированным в архейском карельском блоке Фенноскандии [19]. Несмотря на то, что архейская кора восточной части Фенноскандии имеет относительно низкие значения радиогенного теплообразования, как было показано в исследованиях на территории Финляндии [20,21], крайне низкие значения радиогенного теплообразования в $0,2-0,3$ мкВт/м³, полученные для северо-востока моделируемой области следует рассматривать с осторожностью. Для этой конкретной части изучаемого региона нет опубликованных данных по радиогенному теплообразованию и на данной территории присутствует значительное количество кислых пород, которое теоретически должно повышать общую радиоактивность земной коры [22].

Мантийный тепловой поток Волго-Уралии характеризуется значительной пространственной изменчивостью (рис. 2 д). Большая его часть определяется глубиной литосферно-астеносферной границы. В результате мантийный тепловой поток составляет в среднем около 20 мВт/м² на территории Волго-Уральского сегмента Восточно-Европейского кратона и возрастает до $\sim 25-30$ мВт/м² в Мезенских рифтах к востоку от Балтийского щита и даже до $\sim 35-40$ мВт/м² в Прикаспийской впадине за счёт маломощной термальной литосферы (рис. 2 д). Эти результаты в целом соответствуют работе, проведённой ранее В. Чермаком [23], который получил карту мантийного теплового потока Европы путём вычитания предполагаемой радиогенной коровой составляющей теплового потока из измерений теплового потока на земной поверхности. При этом карта мантийного теплового потока В. Чермака не показывает положительной аномалии на востоке Фенноскандии, полученной в настоящей модели. Такая аномалия является результатом неглубокой термальной литосферы в этом регионе, согласно модели И.М. Артемьевой [14], используемой в настоящей работе.

Согласно построенным моделям, распределение теплового потока на земной поверхности Волго-Уралии определяется главным образом радиогенным теплообразованием земной коры, на долю которого приходится более половины теплового потока на земной поверхности региона. По результатам сравнения смоделированных температур с измеренными было выявлено, что однослойная и многослойная модели земной коры дают примерно одинаковое соответствие измеренных и смоделированных температур. При этом средневзвешенные значения теплопроводности и радиогенного теплообразования многослойной модели практически идентичны значениям данных параметров у однослойной модели [24]. Это означает, что однослойная модель земной коры с вертикально постоянным и радиогенным теплообразованием и теплопроводностью может считаться достаточным приближением для моделирования теплового режима архейских кратонов в региональном масштабе.

Литература

1. Любимова Е.А. [и др.] Тепловой поток на территории СССР. – Каталог данных 1964–1972 гг. – № 3. – 1973. – 64 с.
2. Любимова Е.А., Любоиц В.М., Парфенюк О.И. Численные модели тепловых полей Земли. – Москва: Наука. – 1983. – 125 с.
3. Христофорова Н.Н. Тепловой режим литосферы в зонах нефтегазоаккумуляции на примере Волго-Уральского и Предкавказского регионов. – Казань. – 2002. – 241 с.

4. Христофорова Н.Н. [и др.] Тепловой режим и оценка перспектив нефтегазоносности Приволжского региона // Георесурсы. – 2004. – Т. 15. – № 1. – С. 24–27.
5. Глубинный тепловой поток европейской части СССР / под ред. С.И.Субботин, Р.И. Кутас. – Киев: Наук. думка, 1974. – 190 с.
6. Максимов С.П. Нефтяные и газовые месторождения СССР: Справочник. В двух книгах / под ред. С.П.Максимова. – Москва: Недра, 1987. – 358 с.
7. Голованова И.В. Тепловое поле Южного Урала. – Москва: Наука, 2005. – 187 с.
8. Jaupart C., Mareschal J.-C. Constraints on Crustal Heat Production from Heat Flow Data // Treatise on Geochemistry. Elsevier, 2014. – P. 53–73.
9. Богданова С.В. Земная кора Русской плиты в раннем докембрии (на примере Волго-Уральского сегмента). 1-е изд./ под ред. П.П.Тимофеев [и др.]. – Москва: Наука, 1986. – 224 с.
10. Постников А.В. Фундамент восточной части Восточно-Европейской платформы и его влияние на строение и нефтегазоносность осадочного чехла: Докторская диссертация. Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, 2002. – 221 с.
11. Bibikova E.V. [et al.] Sarmatia-Volgo-Uralia junction zone: Isotopic-geochronologic characteristic of supracrustal rocks and granitoids // Stratigr. Geol. Correl. – 2009. – Vol. 17. – № 6. – P. 561–573.
12. Hasterok D., Gard M., Webb J. On the radiogenic heat production of metamorphic, igneous, and sedimentary rocks // Geoscience Frontiers. – 2018. – Vol. 9. – № 6. – P. 1777–1794.
13. Artyushkov E.V., Baer M.A. Mechanism of formation of hydrocarbon basins: the West Siberia, Volga-Urals, Timan-Pechora basins and the Permian Basin of Texas // Tectonophysics. – 1986. – Vol. 122. – № 3–4. – P. 247–281.
14. Artemieva I.M. Lithosphere structure in Europe from thermal isostasy // Earth-Science Reviews. – 2019. – Vol. 188. – P. 454–468.
15. Artemieva I.M., Thybo H., Kaban M.K. Deep Europe today: geophysical synthesis of the upper mantle structure and lithospheric processes over 3.5 Ga // Geological Society, London, Memoirs. – 2006. – Vol. 32. – № 1. – P. 11–41.
16. Хуторской М.Д., Поляк Б.Г. Искажения теплового поля при росте соляных куполов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: экология и безопасность жизнедеятельности. – 2000. – № 4. – С. 89–94.
17. Brown D. [et al.] Composition of the Uralide crust from seismic velocity (V_p , V_s), heat flow, gravity, and magnetic data // Earth and Planetary Science Letters. – 2003. – Vol. 210. – № 1–2. – P. 333–349.
18. Kukkonen I.T. [et al.] Low geothermal heat flow of the Urals fold belt – implication of low heat production, fluid circulation or palaeoclimate? // Tectonophysics. – 1997. – Vol. 276. – № 1–4. – P. 63–85.
19. Cermak V. Lithospheric thermal regimes in Europe // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1993. – Vol. 79. – № 1–2. – P. 179–193.
20. Jöeleht A., Kukkonen I.T. Thermal properties of granulite facies rocks in the Precambrian basement of Finland and Estonia // Tectonophysics. – 1998. – Vol. 291. – № 1–4. – P. 195–203.
21. Kukkonen I.T., Lahtinen R. Variation of radiogenic heat production rate in 2.8–1.8 Ga old rocks in the central Fennoscandian shield // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2001. – Vol. 126. – № 3–4. – P. 279–294.
22. Svetov S.A., Slabunov A.I., Kulikov V.S. A new geological map of the SE Fennoscandian Shield. Institute of geology, KarRC, RAS: Unpublished, 2018.
23. Cermák V. Crustal temperature and mantle heat flow in Europe // Tectonophysics. – 1982. – Vol. 83. – № 1–2. – P. 123–142.
24. Ognev I. [et al.] The thermal state of Volgo-Uralia from Bayesian inversion of surface heat flow and temperature // Geophysical Journal International. – 2023. – Vol. 232. – № 1. – P. 322–342.