

УДК 550.83:553.988(571.5)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПРОГНОЗА НЕФТЕГАЗОВЫХ ПЕРСПЕКТИВ КОНЦЕНТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Харитонов А. Л.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн

им. Н. В. Пушкова РАН, Москва

E-mail: haritonov-magnit@yandex.ru

Цель данного исследования – показать результаты прогноза нефтегазовых перспектив некоторых концентрических структур на территории Восточно-Сибирской платформы. Исследования проводились с помощью вероятностных методов обработки данных. Этот метод построен на основе использования предварительного анализа различных геолого-геофизических данных (гистограммы мощности земной коры, литосферы, осадочного слоя, геотермического градиента, плотности тектонических разломов), которые были оценены в основных нефтегазоносных бассейнах Российской Федерации. Полученные результаты были использованы для прогноза нефтегазовых перспектив концентрических структур на территории Восточно-Сибирской платформы. В частности, с помощью вероятностных методов обработки с использованием 5 (пяти) геолого-геофизических видов данных в этом регионе были рассчитаны значения вероятностей по 15 (пятнадцати) различным концентрическим структурам. Рассмотрены результаты использования вероятностных методов обработки различных видов геолого-геофизических данных, измеренных в пределах нескольких концентрических структур на территории Восточно-Сибирской платформы. По рассчитанным значениям вероятностей были спрогнозированы территории 3 (трех) концентрических структур (Непско-Ботуобинской, Ангарской, Саяно-Енисейской), расположенных на юге Восточно-Сибирской платформы, перспективных для поисков новых областей с залежами углеводородов. Еще 6 (шесть) концентрических структур (Курейская, Тунгусская, Бахтинская, Камовская, Енисей-Хатангские, Забайкальская) требуют проведения более детальных геологоразведочных работ, т. к. отдельные секторы могут быть перспективны для поисков месторождений нефти и газа.

Ключевые слова: вероятностные методы, Восточная Сибирь, геофизические данные, концентрические структуры, месторождения углеводородов.

DOI: 10.34078/1814-0998-2023-4-13-29

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования настоящей статьи является территория Восточно-Сибирской платформы (ВСП). В качестве предмета исследования может рассматриваться цифровая вероятностная оценка возможной нефтегазовой перспективности пятнадцати концентрических структур (КС), выполненная по мультидисциплинарным геолого-геофизическим данным (ГГД). Первые публикации статей, связанных с изучением геологического строения достаточно крупных КС (более 200 км в диаметре), сформированных мантийными плюмами (МП), начинаются в кон-

це 1970-х годов (Брюханов и др., 1977; Структуры..., 1978; Кац и др., 1989). Другое направление (Хаин, 2003), связанное с изучением относительно небольших по пространственным размерам КС (25–200 км в диаметре) не эндогенного, а импактного происхождения, не будет исследоваться в настоящей статье. Большое значение в изучении КС и формирующих их мантийных плюмов имеют недавно опубликованные научные работы некоторых зарубежных исследователей (Eppelbaum, 2007, 2019; Heron, 2019; Eppelbaum et al., 2021; Koppers et al., 2021). В них на основе интерпретации данных различных геолого-геофизических методов (петрологических, минералогических, тектонических, гравиметрических данных) была выполнена подробная классифика-

ция КС и определение глубины формирующих их мантийных плюмов. Все материалы, изложенные в этих статьях (Erpelbaum, 2007, 2019, 2020; Heron, 2019; Erpelbaum et al., 2021; Koppers et al., 2021), позволили более обоснованно проводить исследования, результаты которых изложены здесь.

В настоящей статье основное внимание уделено вероятностным методам обработки некоторых видов ГГД для проведения геолого-геофизической интерпретации (прогнозирования нефтегазовой перспективности территорий, занимаемых КС с пространственными размерами более 200 км) на территории ВСП. Большую часть территории ВСП занимает КС Восточно-Сибирского геокона (гигантского мантийного плюма) и его «дочерние» КС меньшего диаметра (Брюханов и др., 1977; Структуры..., 1978; Кулаков, 1986).

Юго-восточная часть территории ВСП (Непско-Ботуобинская) является одной из очень перспективных нефтегазоносных областей (НГО) Российской Федерации (РФ), почти такой же по запасам углеводородов (УВ), как Западно-Сибирская нефтегазовая провинция.

Однако по прогнозам некоторых зарубежных экспертов, изложенным в работе А. И. Тимурзиева (2019), предполагается, что к 2030 году добыча нефти на территории РФ может сократиться в два раза из-за истощения уже эксплуатируемых месторождений УВ. При этом нефтегазовая добыча всегда вносила не менее 30 % средств, поступающих в бюджет РФ. Поэтому так важно с помощью уже имеющихся в российских геологических фондах многочисленных ГГД попытаться провести дополнительные не очень затратные исследования для поисков новых НГО на территории ВСП.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящий период времени большое значение начинает приобретать теория глобальной дегазации мантии Земли (Кропоткин, 1985; Сывороткин, 2002; Валяев, 2011; Пиковский, 2011; Сейфуль-Мулюков, 2012; Тимурзиев, 2019), проходившая в течение эволюционного тектономагматического преобразования мантии. С процессами дегазации связаны и процессы постепенного накопления залежей УВ в осадочных породах, в пределах расположения КС (Смирнова, 1997; Валяев, 2011), сформированных древними мантийными плюмами (Larson, 1991; Гаврилов, 1994; Erpelbaum, 2007, 2019; Erpelbaum et al., 2021). Древние мантийные плюмы (геоконы, астеноконы) привели к формированию мантий-

ных нуклеаров (Кац и др., 1989) и их «дочерних» КС меньшего диаметра на поверхности кристаллического фундамента. Проявляются КС также и в вышележащих слоях земной коры (Смирнова, 1997).

В настоящей статье предполагается проанализировать результаты вероятностных методов обработки ГГД, сначала полученных в пределах расположения хорошо изученных нефтегазоносных территорий РФ, а затем провести их сравнение с результатами, полученными в пределах КС на территории ВСП. На этой основе предполагается сделать некоторые прогнозные оценки, где могут быть расположены новые области залежей УВ на территории ВСП.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

На территории ВСП относительно недавно открыт пока один крупный активно эксплуатирующийся Непско-Ботуобинский нефтегазоносный бассейн (НГБ). Однако этих месторождений недостаточно для переориентации наших экспортных газопроводов на территорию Восточной Азии (Китай, Индия и др.). Поэтому необходимо использовать все уже имеющиеся геолого-геофизические данные для разведки новых месторождений УВ на территории ВСП. В настоящий период времени в фондах Министерства природных ресурсов РФ собраны карты разных проекций и различных масштабов ГГД, созданных с помощью основных геофизических методов (сейсморазведка, гравиразведка, геотермия). В данной статье предлагается рассмотреть несколько различных видов ГГД, некоторые из которых могут довольно эффективно использоваться для прогноза новых НГО на территории ВСП. На основании всего вышеизложенного это могут быть следующие ГГД: 1) значения глубины до поверхности Мохоровичича (H_m) по данным сейсморазведки (Вольвовский и др., 1975); 2) значения плотности тектонических разломов ($p_{раз}$) (Беляевский, 1981); 3) значения мощности литосферного слоя (H_l) по данным сейсморазведки (Чермак, 1986); 4) аномалий геотермальной энергии (Q) (Карта..., 1995), обычно расположенных над зонами мантийных плюмов, в которых идет ускоренный тепломассоперенос УВ геоплюмов к поверхности Земли; 5) значения мощности осадочного слоя земной коры (H_o) (Беляевский, 1981), с увеличением которой увеличивается и количество залежей УВ на разных глубинных «этажах» этого слоя.

Для прогноза нефтегазовой перспективности КС на территории ВСП были использова-

ны пять видов ГГД (H_m , $p_{раз}$, H_d , Q , H_0). Почему были выбраны именно эти виды ГГД? В первую очередь потому, что в работе А. Ш. Закирова и А. Л. Харитонов (2014) было показано, что многие месторождения УВ связаны с повышенной мощностью земной коры ($H_m = 40 \pm 5$ км), которые обычно встречаются в зонах КС, в том числе и на исследуемых территориях ВСП. Кроме того, в настоящей статье были высказаны предположения о связи значений мощности литосферы (H_d) (рис. 1, Б) с зонами про-

странственного месторасположения НГО, расположенных в пределах КС, сформированных мантийными плюмами.

Как видно из рис. 1 (А, Б), концентрические изолинии увеличенной мощности земной коры ($H_m = 40 \pm 5$ км) и одновременно изолинии резкого изменения мощности литосферы (H_d) от 100 до 225 км пространственно связаны с расположением следующих КС на территории ВСП: Бахтинской, Курейской, Камовской, Саяно-Енисейской, Ангарской, Непско-Ботуобинской, южной ча-

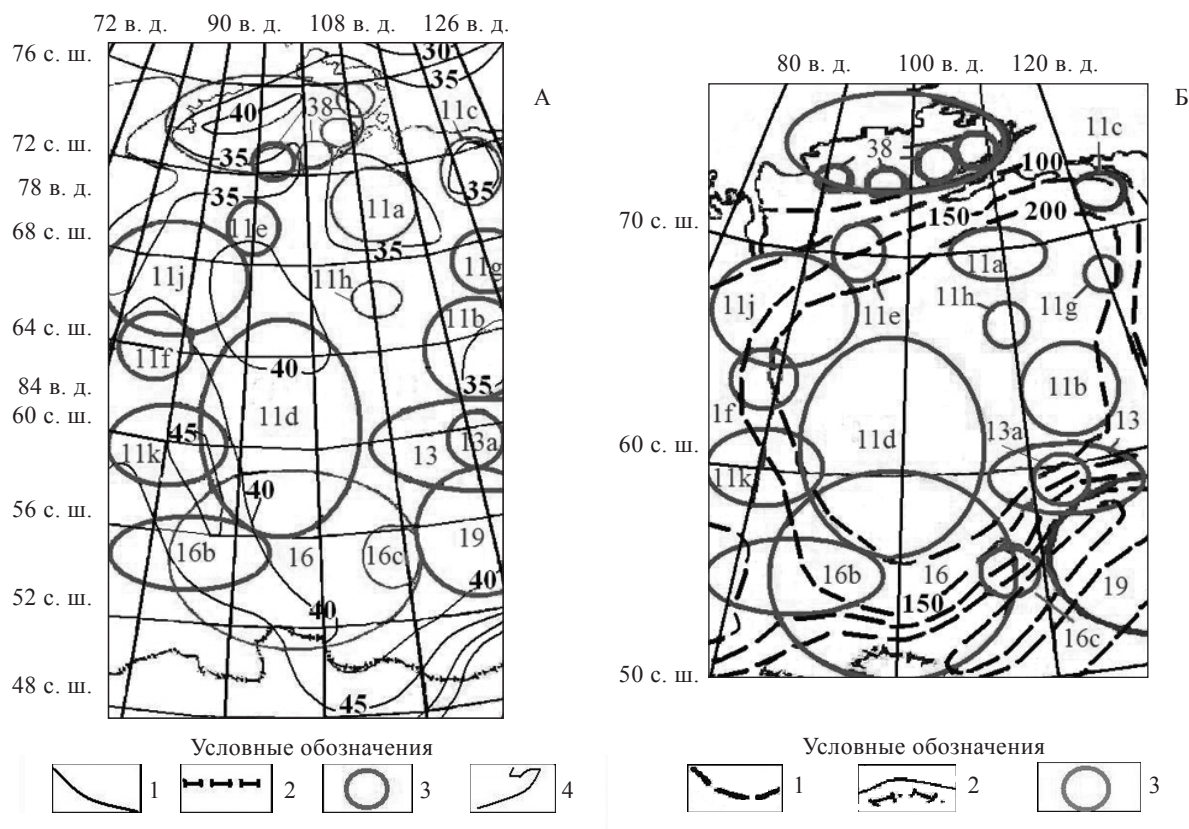


Рис. 1. А – фрагмент карты (мощности земной коры) глубины до поверхности Мохоровичича на территории Восточно-Сибирской платформы, построенной по данным глубинного сейсмического зондирования (Вольвовский и др., 1975 с дополнениями автора). Б – фрагмент карты мощности литосферы (H_d) для территории Восточно-Сибирской платформы (Чермак, 1986 с дополнениями автора), построенной по данным сейсмических волн.

Условные обозначения к рис. 1, А: 1 – изолинии мощности земной коры; 2 – государственная граница Российской Федерации; 3 – окружностями выделены зоны расположения концентрических структур; 4 – обозначение расположения рек.

Условные обозначения к рис. 1, Б: 1 – изолинии мощности литосферы; 2 – государственная граница Российской Федерации; 3 – окружностями выделены зоны расположения концентрических структур.

Fig. 1. А – fragment of the map (the Earth's crust thickness) of the depth to the Moho discontinuity in the East Siberian Platform area, based on the data of deep seismic sounding (Volvovsky et al., 1975 added by the author). Б – fragment of the map of the lithosphere thickness (H_d) for the East Siberian Platform area (Chermak et al., 1986 added by the author), based on the seismic waves data.

Legend for Fig. 1, А: 1 – isolines of the Earth's crust thickness; 2 – state border of the Russian Federation; 3 – circles mark zones of concentric structure locations; 4 – river locations.

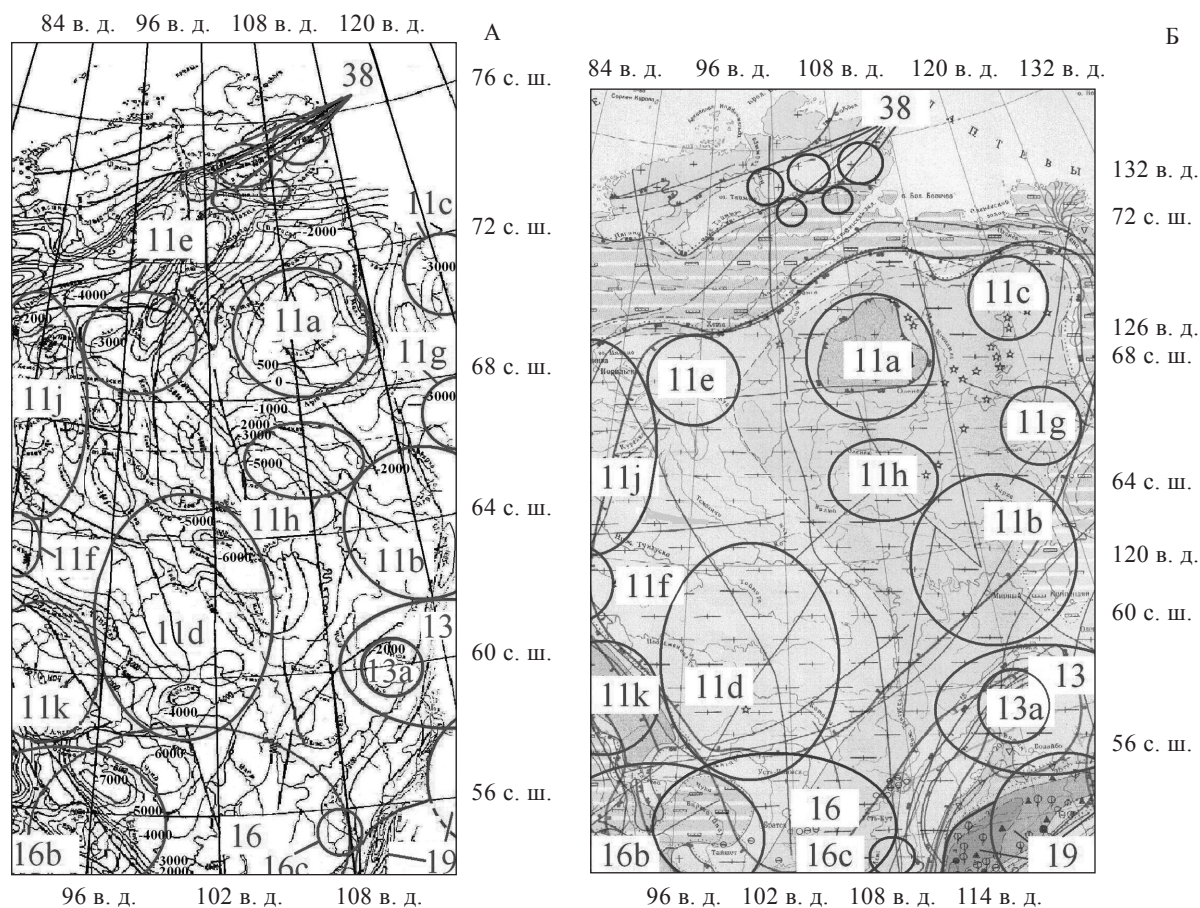
Legend for Fig. 1, Б: 1 – isolines of the lithosphere thickness; 2 – state border of the Russian Federation; 3 – circles mark zones of concentric structure locations.

сти Хетской, северной части Забайкальской. На территории этих КС либо пока не найдено месторождений УВ, либо найдено только 1–2 небольших месторождения УВ (кроме НГО в Непско-Ботуобинской КС). Необходимо проверить, будут ли все вышеперечисленные КС такими же нефтегазоперспективными, как Непско-Ботуобинская КС. Для поисков новых перспективных НГО в пределах КС на территории ВСП, по-видимому, было бы целесообразно каким-либо математическим способом количественно проанализировать в пределах КС значения мощности земной коры (H_m) (рис. 1, А), мощности литосферы (H_l) (рис. 1, Б) и некоторые другие ГГД. Необходимо также

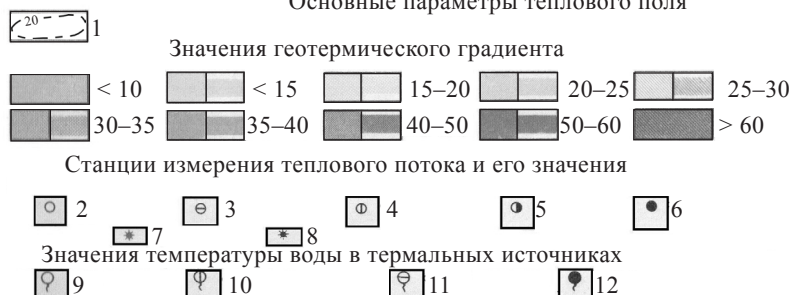
посмотреть, совпадают ли эти значения ГГД и значения геотермальной энергии с расположением каких-либо КС, через территорию которых может происходить дегазации УВ геофлюидов из активных еще и в настоящий период мантийных плюмов.

Аналогичная ситуация наблюдается и в расположении изолиний мощности осадочного слоя земной коры (рис. 2, А), тектонических разломов, окружающих крупные КС (рис. 2, А), и значений геотермальной энергии (рис. 2, Б) на территории ВСП.

Известно также, что через зоны расположения мантийных плюмов и сформированных ими КС периодически происходил интенсив-



Условные обозначения
Основные параметры теплового поля



ный тепломассоперенос и миграция УВ геофлюидов (Смирнова, 1997; Валяев, 2011) из мантии. При подготовке этой статьи были проанализированы также значения геотермальной энергии (геотермического градиента) (Q) (в диапазоне от $Q < 10$ до $Q > 60$ °C / 1000 м) (рис. 2, Б) (Карта..., 1995), расположенных в основных НГБ РФ.

Для прогноза новых НГО на территории ВСП предлагается рассмотреть в данной статье использование вероятностных методов обработки ГГД, опираясь на ранее проведенные исследования (Закиров, Харитонов, 2014).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для прогноза углеводородной перспективности КС на территории ВСП предлагается использовать элементы теории вероятности (Бендат, Пирсол, 1974; Erpelbaum, 2020). На основании

использования вероятностных методов обработки различных ГГД ($H_m, p_{раз}, H_d, Q, H_o$) была сделана попытка не субъективно (не гипотетически), а количественно с помощью методов вероятности и математической статистики проанализировать, почему на территории ВСП несколько примерно одинаковых по диаметру КС с аналогичными средними значениями мощности земной коры (H_m) и мощности литосферы (H_d), со схожей плотностью тектонических разломов ($p_{раз}$), похожими значениями геотермальной энергии (Q) и мощности осадочного слоя земной коры (H_o) имеют в своих пределах различное количество месторождений УВ.

Все известные вероятностные критерии принятия решений о наличии или отсутствии аномалии в исследуемых данных обычно базируются на теории проверки статистических гипотез (I и II рода) (Вентцель, 1969; Бендат, Пирсол, 1974; Никитин, 1979; Erpelbaum, 2020). Для проверки

←
Рис. 2. А – фрагмент карты рельефа складчатого основания земной коры территории России и сопредельных стран (Беляевский, 1981 с дополнениями автора). Б – фрагмент карты геотермальной энергии Российской Федерации (Карта..., 1995 с дополнениями автора).

Условные обозначения к рис. 2, А: 1 – изолинии вертикальной мощности осадочного слоя земной коры; 2 – окружностями выделены зоны расположения концентрических структур.

Условные обозначения к рис. 2, Б: Основные параметры теплового поля: 1 – изолинии геотермического градиента в верхней части земной коры (°C/км); 2–6 – станции измерения теплового потока и его значения (в 10^{-2} Вт/м²): 2 – 2–4; 3 – 4–6; 4 – 6–8; 5 – 8–10; 6 – > 10; вулканы: 7 – действующие; 8 – потухшие в кайнозойское время; 9–12 – значения температуры воды в термальных источниках (в градусах Цельсия); 9 – до 20; 10 – от 20 до 50; 11 – от 50 до 75; 12 – от 75 до 100. Типы геотермического режима: области стационарного теплового режима: 13 – в пределах складчатых областей; 14 – в пределах древних платформ; области нестационарного теплового потока: 15 – с конвективным переносом тепла термальными водами и магматическими расплавами корового и подкорового разогрева; 16 – с усиленной кондуктивной передачей тепла (области охлаждения); 17 – области с накоплением тепла под слоем мезо-кайнозойских слабо литифицированных осадочных отложений с низкой теплопроводностью – области верхнекорового разогрева; 18 – блоки земной коры с пониженной генерацией радиогенного тепла; 19 – блоки земной коры с повышенной генерацией радиогенного тепла; 20 – участки локального разогрева в мезо-кайнозое в результате процессов взрывного характера. Окружностями карте обозначены зоны расположения концентрических структур на территории Восточно-Сибирской платформы.

Fig. 2. A – fragment of the relief map of the Earth's crust folded basement in Russia and the neighboring countries (Belyaevsky, 1981 added by the author). Б – fragment of the Russian Federation geothermal energy map (Smyslov et al., 1995 added by the author).

Legend for Fig. 2, A: 1 – vertical thickness isolines of the Earth's crust sedimental layer; 2 – circles highlight zones of concentric structure locations.

Legend for Fig. 2, B: Basic parameters of the thermal field: 1 – isolines of the geothermal gradient in the Earth's crust upper part (°C/km); 2–6 – stations for measuring the heat flow and its values (in 10^{-2} w/m²): 2 – 2–4; 3 – 4–6; 4 – 6–8; 5 – 8–10; 6 – > 10; volcanoes: 7 – active; 8 – extinct in Cenozoic; 9–12 – water temperature values in thermal springs (Celsius); 9 – to 20; 10 – 20 through 50; 11 – 50 through 75; 12 – 75 through 100. Geothermal mode types: stationary thermal mode areas: 13 – within folded areas; 14 – within ancient platforms; areas of the unsteady heat flow: 15 – with convective heat transfer by thermal waters and magmatic melts of crustal and subcortical heating; 16 – with enhanced conductive heat transfer (cooling areas); 17 – areas with heat accumulation under the layer of Meso-Cenozoic weakly lithified sedimentary deposits with low thermal conductivity – areas of upper crustal heating; 18 – blocks of the Earth's crust with reduced generation of radiogenic heat; 19 – blocks of the Earth's crust with increased generation of radiogenic heat; 20 – areas of local heating in Meso-Cenozoic as a result of explosive processes. Circles indicate zones of concentric structures in the East Siberian Platform area.

статистических гипотез необходима информация о цифровых данных, представленных на гистограммах $N(\Phi_i)$ и графиках условных плотностей распределения для гипотезы наличия $p(\Phi_i/H_1)$ и отсутствия $p(\Phi_i/H_0)$ аномалии в анализируемых видах ГГД. На основе длинных рядов ГГД, снятых с оцифрованных карт (Вольвовский и др., 1975; Ананьева и др., 1977; Беляевский, 1981; Чермак, 1986; Карта..., 1995), был произведен расчет и построение гистограмм $N(\Phi_i)$ по значениям четырех видов ГГД ($H_m, p_{\text{раз}}, H_l, Q$). Гистограмма, как и понятие классической вероятности, описывает распределение частот $N(\Phi_i) = (m/n)$, определяемых для каждого из n – общего количества значений (Φ) ряда случайных величин определенного вида ГГД (Вычислительная..., 1982). Обозначим фиксированную выборку ряда из n исследуемых значений $f(x_j)$ какого-либо вида ГГД ($\Phi(x_j)$) как:

$$\Phi_i(x_j) = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)] \quad (1)$$

На рис. 3 представлены гистограммы распределения значений рядов следующих ГГД: глубины до поверхности Мохоровичича $N(H_m)$, плотности распределения тектонических разломов $N(p_{\text{раз}})$, мощности литосферы $N(H_l)$, геотермальной энергии $N(Q)$, зафиксированных на территории основных НГБ РФ.

Из представленной на рис. 3 (А) гистограммы $N(H_m)$ видно, что многие НГО на территории РФ расположены в регионах, где наблюдаются повышенные значения мощности земной коры ($H_m = 40$ км) по сравнению со средними значениями этого параметра по всей Земле ($H_m = 33$ км). Другая гистограмма $N(p_{\text{раз}})$ (рис. 3, Б) плотности расположения тектонических разломов в пределах территории НГБ РФ была построена по данным карт (Ананьева и др., 1977; Беляевский, 1981). На построенной гистограмме $N(H_l)$ (рис. 3, В) выделено три значения мощности литосферы 100, 150, 220 км, зафиксированных на территории НГБ РФ (Западно-Сибирский, Ямало-Ненецкий, Волго-Уральский, Тимано-Печорский, Прикаспийский, Северо-Кавказский). Гистограмма $N(Q)$, построенная на рис. 3 (Г), показывает, что значения геотермальной энергии в основных НГБ РФ также имеют повышенные значения этого параметра. Были также рассчитаны и построены гистограммы $N(\Phi_i)$ по рядам аналогичных видов ГГД (H_m, H_l) для тех регионов Русской платформы, где отсутствуют месторождения УВ. Оказалось, что на тех территориях, где отсутствуют НГО, в гистограммах глубины поверхности Мохоровичича $N(H_m)$ помимо основного максимума на 40 км присутствуют еще два боковых максимума на глубинах

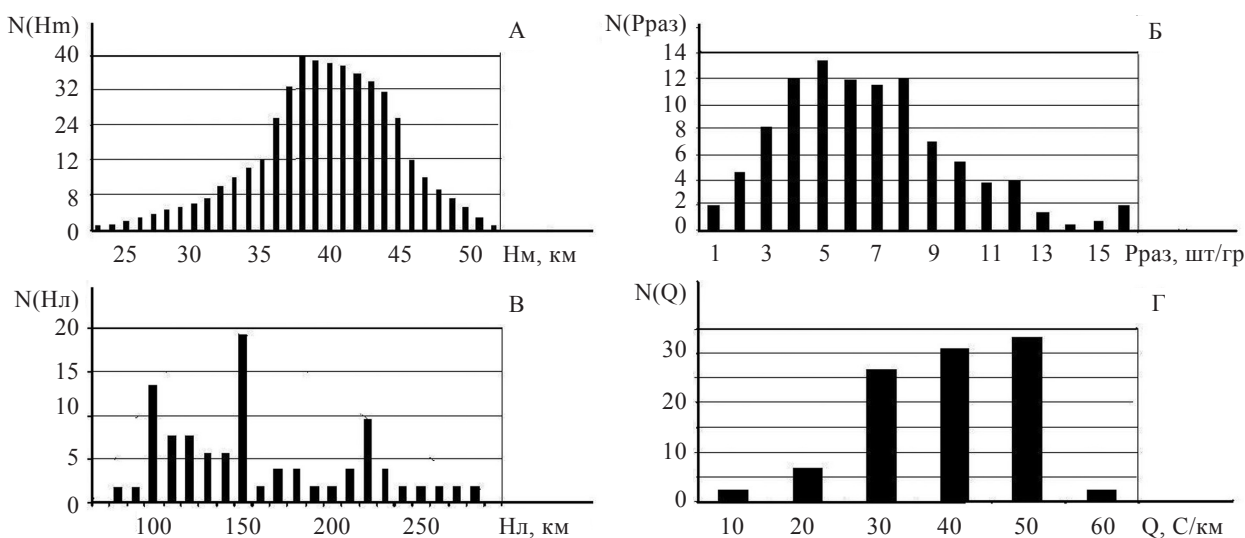


Рис. 3. Гистограммы, характерные для НГБ РФ, построенные по нижеследующим ГГД: А – мощность земной коры $N(H_m)$ по значениям оцифрованной карты (Вольвовский и др., 1975); Б – плотности тектонических разломов $N(p_{\text{раз}})$ по данным карты (Ананьева и др., 1974; Беляевский, 1981); В – мощности литосферы $N(H_l)$ по данным оцифрованной карты (Чермак, 1986); Г – значения геотермальной энергии $N(Q)$ по данным одноименной оцифрованной карты (Карта..., 1995).

Fig. 3. Histograms, characteristic for oil and gas-bearing territories in the Russian Federation, according to the following geological and geophysical data: А – thickness of the Earth's crust $N(H_m)$ by the values of the digitized map (Volvovsky et al., 1975); Б – density of large tectonic faults $N(p_{\text{раз}})$ by the map (Ananyeva et al., 1974; Belyaevsky, 1981); В – thickness of the lithosphere $N(H_l)$ by the values of the digitized map (Chermak, 1986); Г – values of geothermal energy $N(Q)$ by the values of the digitized map of the same name (Map..., 1995).

33–35 км и 45–47 км. Эти максимумы на гистограмме $N(H_m)$ для территории Русской платформы получены по ГГД, которые не связаны с расположением НГБ РФ. Аналогичная ситуация наблюдается на гистограмме мощности литосферы $N(H_d)$, где также выделяются два боковых максимума на 100 км и 220 км. Эти максимумы на гистограмме $N(H_d)$ для территории Русской платформы также получены по ГГД, которые не были связаны с расположением НГБ РФ. Несколько другая ситуация наблюдается с плотностью глубинных тектонических разломов в тех регионах России, где пока не найдено значительного количества месторождений нефти и газа. Например, на территориях континентальной части Дальнего Востока РФ (Чукотский, Камчатский регионы) плотность глубинных тектонических разломов колеблется от 7 до 15 на площади $4^\circ \times 6^\circ$ в стандартной сетке карты разломов (Ананьева и др., 1977).

Полученные в пределах НГБ РФ и вне их расположения данные гистограмм (рис. 3) затем были использованы при расчетах значений условных плотностей распределения для гипотез наличия аномалии $p(\Phi_i/H_1)$ и ее отсутствия $p(\Phi_i/H_0)$.

Затем необходимо было проверить, соответствуют ли значения построенной по данным гистограммы статистической (условной) плотности распределения определенному виду теоретической плотности распределения (Гауссовому, равномерному, Пуассона и др.). Для этого был использован критерий Колмогорова (Вычислительная..., 1982), который можно представить в следующем виде:

$$\lambda = D * [\sqrt{n}], \quad (2)$$

где $D = \max |F_n(x) - F(x)|$ – максимум модуля разности между статистической функцией распределения $F_n(x)$ и теоретической $F(x)$. Вероятность их соответствия определяется по данным соответствующих таблиц (Вентцель, 1969). Согласно проведенным расчетам по критерию Колмогорова (Бендат, Пирсол, 1974; Вычислительная..., 1982), теоретическое распределение значений условной плотности распределения $p(H_m/H_1)$ мощности земной коры (рис. 4, А), мощности литосферы $p(H_d/H_1)$ (рис. 4, В) и распределения тектонических разломов $p(p_{раз}/H_1)$ (рис. 4, Б) оказались близкими к закону распределения Гаусса, а распределение значений геотермальной энергии $p(Q/H_1)$ – к равномерному закону распределения (рис. 4, Г).

Из данных, приведенных на рис. 4 (А, Б, В), можно видеть, что на графике теоретической плотности распределения Гаусса $p(\Phi_i/H_1)$ существуют две области (α, β) , связанные с ошибками I и II рода. Вероятность ошибки I рода, обнаружения ложной аномалии (α) определяется следующим интегральным выражением:

$$\alpha = \int p(\Phi_i/H_0) d\Omega(\Phi), \quad (3)$$

где $d\Omega(\Phi)$ – n -мерное пространство выборки анализируемых значений ГГД.

Вероятность ошибки II рода, пропуска действительной аномалии (β) определяется следующим интегральным выражением:

$$\beta = \int p(\Phi_i/H_1) d\Omega(\Phi) \quad (4)$$

По данным, представленным на графиках теоретических функций распределения разных видов ГГД, собранных в пределах территорий, занимаемых НГБ РФ (рис. 4), были определены значения априорных вероятностей $P_a(\Phi_i/H_1)$, $P_a(\Phi_i/H_0)$.

В результате подсчета суммарных значений этих вероятностных параметров (α, β) , зафиксированных в зонах пересечения кривых плотностей распределения (рис. 4), можно определить значение среднего риска принятия решения по формуле:

$$r(h) = C_\alpha \times P_a(\Phi_i/H_0) \times \alpha + C_\beta \times P_a(\Phi_i/H_1) \times \beta, \quad (5)$$

где $P_a(\Phi_i/H_1)$, $P_a(\Phi_i/H_0)$ называются априорными вероятностями гипотез наличия H_1 и отсутствия H_0 полезной аномалии; C_α и C_β – цены ошибок I и II рода.

На основании этих данных определялись значения порога (h) принятия, разделяющего пространство $d\Omega(\Phi)$ значений используемого вида ГГД на две области S_1 и S_0 условной плотности распределения $p(\Phi_i/H_1)$ и $p(\Phi_i/H_0)$ (рис. 4). Минимизация среднего риска по критерию Байеса приводит к определению значения порога принятия решения, равному:

$$h = [C_\alpha \times P_a(\Phi_i/H_0)] / [C_\beta \times P_a(\Phi_i/H_1)] \quad (6)$$

Далее по каждому виду оцифрованных с карт ГГД в пределах каждой из 15 анализируемых КС на территории ВСП по двум радиальным направлениям КС определялось среднее значение каждого вида ГГД. Затем для этого среднего значения ГГД, полученного в пределах каждой КС, на основании сравнения с графиком теоретической плотности распределения проводился расчет коэффициента правдоподобия (Λ) для каждой исследуемой КС по следующей формуле (Никитин, 1979):

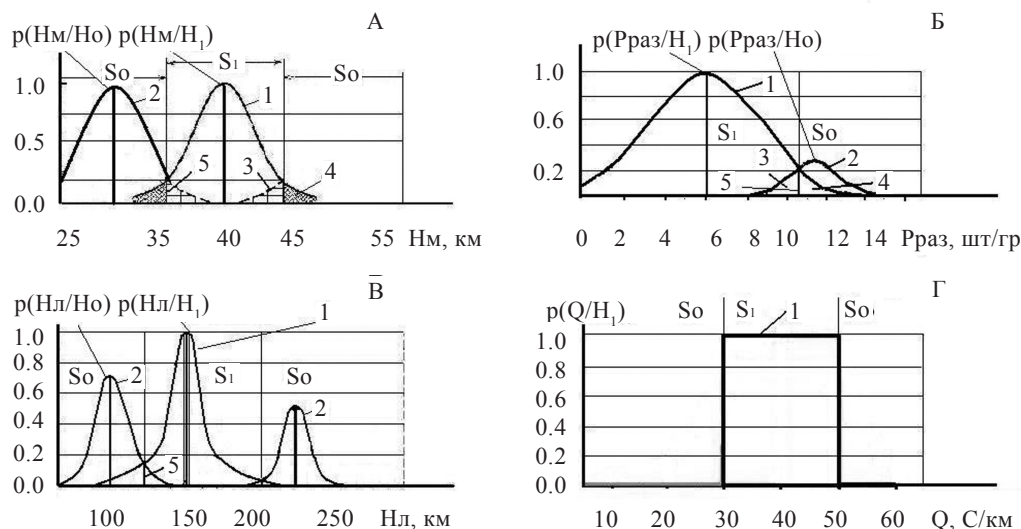


Рис. 4. А – кривые теоретической плотности распределения, соответствующие закону распределения Гаусса для значений мощности земной коры (H_M), характерных для нефтегазоносных провинций РФ (1) и при отсутствии таковых (2); 3 – параметр α , связанный с ошибками I рода; 4 – параметр β , связанный с ошибками II рода; 5 – линия, соответствующая значению порога принятия решения (h), которая разделяет пространство значений анализируемого вида данных на области S_1 , S_0 . Б – кривые теоретических плотностей распределения значений плотности тектонических разломов ($p_{\text{раз}}$) (см. обозначения для графика А). В – кривая статистической условной плотности распределения значений мощности литосферы (см. обозначения для графика А). Г – кривая теоретической (1) плотности распределения $p(Q/H_1)$ значений геотермальной энергии, аппроксимированная с помощью равномерного закона распределения, полученных ГГД в нефтегазоносных провинциях РФ.

Fig. 4. А – curves of the theoretical distribution density corresponding to the Gauss distribution law for the values of the crustal thickness (H_M) characteristic for the oil and gas provinces in the Russian Federation (1) and in the absence of such (2); 3 – parameter α associated with type I errors; 4 – parameter β associated with type II errors; 5 – line corresponding to the value of the decision threshold (h), which divides the space of the analyzed data type values into areas S_1 , S_0 . Б – curves of theoretical densities of the tectonic fault density values distribution ($p_{\text{раз}}$) (see Legend for graph A); В – curve of the statistical conditional density of the lithospheric thickness values distribution (see Legend for graph A); Г – curve of the theoretical (1) density of the distribution $p(Q/H_1)$ for geothermal energy values, approximated using the uniform distribution law for the geological-geophysical data obtained in the oil and gas provinces of the Russian Federation.

$$\Lambda(\Phi_i) = [p(\Phi_i/H_1)/p(\Phi_i/H_0)] \quad (7)$$

Затем для каждой исследуемой КС проводилось сравнение рассчитанного порогового значения (h), определенного по каждому виду ГГД на территории НГБ, с коэффициентом правдоподобия (Λ). Если значение коэффициента правдоподобия (Λ) для исследуемой КС было выше порогового значения (h) исследуемого вида ГГД, то принималось решение о гипотезе наличия (H_1) аномалии этого вида ГГД, в противном случае – решение о гипотезе ее отсутствия (H_0) в пределах этой КС. Если значение коэффициента правдоподобия (Λ) для исследуемой КС было выше порогового значения (h), то тогда уже по значениям теоретической плотности распределения рассчитывалось значение вероятности для исследуемой КС по каждому виду ГГД. Для этого использовался график одномерной теоретической плотности распределения $p(\Phi_i/H_1)$, расположенный в области S_1 .

Известно, что одномерная теоретическая плотность распределения $p(\Phi_i/H_1)$ случайного процесса определяет вероятность того, что значения этого процесса в произвольный момент (x) расположения на профиле измерений будут заключены в определенном интервале ($\Delta\Phi_i$) и при этом значения вероятности $P(\Phi_i)$ и теоретической плотности распределения $p(\Phi_i/H_1)$ случайного процесса могут быть представлены в виде следующей формулы (Бендат, Пирсол, 1974):

$$P\{\Phi_i < [\Phi_i(x)/H_1] < \Phi_i + \Delta\Phi_i\} \approx p(\Phi_i/H_1) \times \Delta\Phi_i \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что вероятность $P(\Phi_i/H_1)$ наличия определенного события (аномалии ГГД) (Φ_i) с точностью до величины этого интервала ($\Delta\Phi_i$) будет соответствовать значению теоретической плотности распределения $p(\Phi_i/H_1)$ случайного процесса, которые для анализируемых видов ГГД представлены на рис. 4.

В пределах каждой из пятнадцати исследуемых КС на территории ВСП сначала было выполнено определение необходимого количества точек для каждой КС. Поскольку были приняты за априорные значения вероятности для гипотез наличия $P_a(\Phi/H_1)$ и отсутствия $P_a(\Phi/H_0)$ аномалии какого-либо вида ГГД, которые были получены в пределах НГБ, формула для определения необходимого количества точек измерения в пределах каждой исследуемой КС на территории ВСП может быть записана в следующем виде (Свешников, 1970):

$$n > \{\ln [1 - P_a(\Phi/H_1)]\} / \{\ln [1 - P_a(\Phi/H_0)]\} \quad (9)$$

После определения необходимого количества точек измерений для каждой КС (но не менее n), производимых с одинаковым интервалом дискретизации Δx для всех КС, на основании вышеизложенных методов обработки данных был произведен расчет вероятностей по всем пяти исследуемым видам ГГД в пределах каждой из пятнадцати КС на территории ВСП.

График теоретической плотности распределения геотермальной энергии представлен на рис. 4, Г (кривая 1). В соответствии с материалами по теории вероятностей и математической статистике, изложенных Дж. Бендатом и А. Пирсом (1974), закон равномерного распределения можно описать следующей формулой:

$$\begin{aligned} p(Q/H_1) &= 1/(Q_2 - Q_1); \quad \text{если } Q_1 < Q < Q_2 \\ p(Q/H_1) &= 0; \quad \text{если } Q < Q_1 \text{ или } Q > Q_2 \end{aligned} \quad (10)$$

Для получения окончательного результата проведенных исследований по вероятностям всех пяти видов используемых ГГД $P_i(\Phi)$ (i – номер определенного вида ГГД) производилась оценка среднего значения вероятности $P_c(\Phi)$ в пределах каждой из пятнадцати КС. Кроме того, можно считать, что для вычисления вероятностей всех исследуемых видов ГГД ($H_m, p_{\text{раз}}, H_l, Q, H_o$) используют статистически независимые ГГД. При этом выявление одного из статистических событий не изменяет вероятности появления других статистических событий по иному виду ГГД. Для статистически независимых событий общая вероятность этих нескольких событий равна произведению вероятностей (Вычислительная..., 1982):

$$P^*(\Phi) = [P_1(\Phi) \times P_2(\Phi) \times P_3(\Phi) \times P_4(\Phi) \times P_5(\Phi)] / 5, \quad (11)$$

где $P_1(\Phi)$ – $P_5(\Phi)$ – вероятности, рассчитанные по соответствующим значениям ГГД в пределах месторасположения каждой КС на территории ВСП: $P_1(\Phi)$ – значения вероятности, опреде-

ляемые по данным (H_m) мощности земной коры; $P_2(\Phi)$ – значения вероятности, определяемые по данным ($p_{\text{раз}}$) плотности глубинных тектонических разломов; $P_3(\Phi)$ – значения вероятности, определяемые по данным (H_l) мощности литосферы; $P_4(\Phi)$ – значения вероятности, определяемые по данным значений геотермальной энергии (Q); $P_5(\Phi)$ – значения вероятности, определяемые по данным (H_o) мощности осадочного слоя земной коры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе для расчетов были использованы только два радиальных направления в пределах КС (север–юг, запад–восток) для оцифровки ГГД с различных видов карт. Из представленных на рис. 4 кривых видно, что пересечение графика теоретической плотности распределения в области S_1 и графиков плотности распределения, связанных с областью S_0 , не превышает порогового значения $h \approx 0.20$. Поэтому было принято значение априорной вероятности для гипотезы отсутствия аномалии $P_a(H_m/H_o) \approx 0.20$, а значение априорной вероятности для гипотезы наличия аномалии было принято равным $P_a(H_l/H_1) \approx 0.95$. Используя значения априорных вероятностей, было также определено по формуле (9) минимальное количество ($n > 14$) точек измерения в пределах каждой КС, которое необходимо для проведения корректных расчетов вероятностных параметров.

На основании проведенных расчетов по формулам (1)–(9) по значениям мощности земной коры были получены значения вероятностей $P_1(H_m)$ для каждой из пятнадцати КС, расположенных на территории ВСП, которые составили для: Центрально-Анабарской – 0.40, Южно-Сюгджерской – 0.40, Оленёкской – 0.40, Тунгусской – 0.85, Хетской – 0.95, Бахтинской – 0.95, Мархинской – 0.50, Северо-Сюгджерской – 0.40, Курейской – 0.90, Камовской – 0.70, Непско-Ботуобинской – 0.77, Ангарской – 0.80, Саяно-Енисейской – 0.77, Забайкальской – 0.90, Енисей-Хатангских – 0.42.

Аналогичным образом по оцифрованным с карты (Ананьева и др., 1977; Беляевский, 1981) данным о плотности тектонических разломов ($p_{\text{раз}}$) была сначала построена гистограмма $N(p_{\text{раз}})$ (рис. 3, Б) и по ней рассчитаны и построены кривые теоретической плотности распределения для гипотезы наличия $p(p_{\text{раз}}/H_1)$ и отсутствия $p(p_{\text{раз}}/H_0)$ аномалии, характеризующие определенные значения мощности литосферы в зонах расположения вышеперечисленных НГБ РФ

(рис. 4, Б). На основании проведенных расчетов по формулам (1)–(7) были получены значения вероятностей $P_2(p_{\text{раз}})$ по данным о плотности тектонических разломов для каждой из пятнадцати КС, расположенных на территории ВСП, которые составили для: Центрально-Анабарской – 0.02, Южно-Сюгджерской – 0.02, Оленёнской – 0.01, Тунгусской – 0.02, Хетской – 0.01, Бахтинской – 0.15, Мархинской – 0.01, Северо-Сюгджерской – 0.02, Курейской – 0.01, Камовской – 0.12, Непско-Ботуобинской – 0.43, Ангарской – 0.03, Саяно-Енисейской – 0.16, Забайкальской – 0.12, Енисей-Хатангских – 0.05.

Подобным образом по оцифрованным с карты данным мощности литосферы ($H_{\text{л}}$) была сначала построена гистограмма $N(H_{\text{л}})$ (рис. 3, В) и по ней рассчитаны и построены кривые теоретической плотности распределения (в области S_1) для гипотезы наличия $p(H_{\text{л}}/H_1)$ и отсутствия $p(H_{\text{л}}/H_0)$ аномалии (в области S_0) (рис. 4, В), характеризующие определенные значения мощности литосферы в зонах расположения вышеперечисленных НГБ РФ. Основываясь на теории дегазации мантии Земли и теоретических данных (Сейфуль-Мулюков, 2012) о глубине расположения так называемого нефтяного слоя, где идут процессы термобарического преобразования первичных углеводородов в более сложные формы, в качестве основной была принята глубина этого слоя, равная 150 ± 90 км. В соответствии с проведенными геофизическими исследо-

ваниями (Пиковский, 2011) установлено, что на этой глубине (150 ± 90 км) выявлены флюидонасыщенные зоны. Во многих работах (Кропоткин, 1985; Пиковский, 2011; Сейфуль-Мулюков, 2012; Тимурзиев, 2019) высказаны предположения о наличии в этих глубинных зонах залежей УВ. В РФ, США, Японии проведены экспериментальные исследования, которые показывают, что температуры ($1250\text{--}2000$ °С) и давления (4–8 ГПа), существующие в этом диапазоне глубин, позволяют идти процессам синтеза нефти из простейших УВ в результате дегазации их из мантии. Области S_0 на кривой теоретической плотности распределения значений мощности литосферы (соответствующие глубинам 100 км и 220 км) (рис. 4, В), по-видимому, не связаны с процессами синтеза нефти, происходящими только в определенном термобарическом диапазоне. Поэтому эти графики теоретической плотности распределения (соответствующие 100 км и 220 км) выступают в качестве областей S_0 – гипотез отсутствия аномалии (рис. 4, В). С помощью использования представленных выше вероятностных методов обработки ГГД (формулы (1)–(9)) по значениям мощности литосферы, зафиксированных в пределах каждой КС на территории ВСП, были рассчитаны значения вероятностей $P_3(H_{\text{л}})$, которые составили для: Центрально-Анабарской – 0.50, Южно-Сюгджерской – 0.20, Оленёнской – 0.20, Тунгусской – 0.30, Хетской – 0.95, Бахтинской – 0.20,

Таблица. Результаты расчета значений вероятностей по пяти видам ГГД, используемых для прогноза нефтегазовой перспективности пятнадцати различных концентрических структур на территории ВСП

Table. Results of probability values calculating for 5 types of geological and geophysical data used to predict oil and gas prospects of 15 various concentric structures in the East Siberian Platform area

№	Название КС	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P^*	P_c
11a	Центр.-Анабарская	0.40	0.02	0.50	0.20	0.09	0.00	0.24
11b	Юж.-Сюгджерская	0.40	0.02	0.20	0.20	0.13	0.00	0.19
11c	Оленёнская	0.40	0.01	0.20	0.20	0.20	0.00	0.20
11d	Тунгусская	0.85	0.02	0.30	0.20	0.30	0.02	0.33
11e	Хетская	0.95	0.01	0.10	0.20	0.27	0.00	0.31
11f	Бахтинская	0.95	0.15	0.20	0.20	0.20	0.01	0.34
11g	Мархинская	0.50	0.01	0.10	0.20	0.20	0.00	0.20
11h	Сев.-Сюгджерская	0.40	0.02	0.35	0.20	0.17	0.00	0.23
11j	Курейская	0.90	0.01	0.20	0.20	0.37	0.01	0.34
11k	Камовская	0.70	0.12	0.20	0.30	0.40	0.02	0.34
13	Непско-Ботуобинская	0.77	0.43	0.80	0.35	0.13	0.03	0.50
16	Ангарская	0.80	0.03	0.80	0.35	0.30	0.03	0.46
16b	Саяно-Енисейская	0.77	0.16	0.37	0.80	0.22	0.05	0.46
19	Забайкальская	0.40	0.02	0.40	0.80	0.07	0.02	0.34
38	Енисей-Хатангские	0.42	0.05	0.70	0.40	0.25	0.00	0.36
	Среднее $P(\Phi)_{\text{ТКС}}$	0.68	0.07	0.36	0.32	0.20	0.01	0.32

Мархинской – 0.10, Северо-Сюгджерской – 0.35, Курейской – 0.20, Камовской – 0.20, Непско-Ботуобинской – 0.80, Ангарской – 0.80, Саяно-Енисейской – 0.37, Забайкальской – 0.40, Енисей-Хатангских – 0.10.

По данным, полученным с оцифрованной карты геотермальной энергии (геотермического градиента) РФ, была построена гистограмма $N(Q)$ и по ее данным рассчитана кривая плотности распределения $p(Q/H_1)$ значений геотермальной энергии (рис. 4, Г), измеренных на территории основных НГО РФ. По проведенным расчетам по формулам (1)–(10) оказалось, что данные гистограммы $N(Q)$, приведенные на рис. 3 (Г), и данные теоретического (равномерного) закона распределения значений геотермальной энергии наиболее соответствуют друг другу при значении моды (значения геотермического градиента), начинающейся от $Q_1 = 30$ и до $Q_2 = 50$ ($^{\circ}\text{C}/\text{км}$). Таким образом, из рис. 4 (Г) можно видеть, что рассчитанная кривая теоретической плотности распределения $p(Q/H_1)$ геотермальной энергии соответствует равномерному закону распределения проанализированного ряда данных геотермальной энергии, измеренных на территории расположения НГБ РФ. Используя данные гистограммы $N(Q)$ (рис. 3, Г) и кривой теоретической плотности распределения $p(Q/H_1)$ (рис. 4, Г) значений геотермальной энергии (Q), были определены значения вероятностей $P_4(Q/H_1)$, зафиксированных в пределах КС на территории ВСП, которые составили для: Центрально-Анабарской – 0.20, Южно-Сюгджерской – 0.20, Оленёкской – 0.20, Тунгусской – 0.20, Хетской – 0.20, Бахтинской – 0.20, Мархинской – 0.20, Северо-Сюгджерской – 0.20, Курейской – 0.20, Камовской – 0.30, Непско-Ботуобинской – 0.35, Ангарской – 0.35, Саяно-Енисейской – 0.80, Забайкальской – 0.80, Енисей-Хатангских – 0.40.

Из работ М. Н. Смирновой (1997) и Б. М. Валяева (2011) известно, что нефтегазовая перспективность территорий, расположенных в пределах КС, зависит также от мощности осадочного слоя (H_o) земной коры. Максимальная мощность осадочного слоя в некоторых глубоких депрессиях на территории НГБ РФ составляет до 15 км. Поэтому вероятность $P_5(H_o)$, связанную с нефтегазовой перспективностью в зависимости от мощности осадочного слоя, оценивали пропорционально средней мощности слоя осадочных пород в пределах каждой исследуемой КС, нормируя эти значения на максимальное значение мощности осадочных пород на территории НГБ РФ. Эмпирически оцененные значения вероятностей для каждой КС на территории ВСП

составили для: Центрально-Анабарской – 0.09, Южно-Сюгджерской – 0.13, Оленёкской – 0.20, Тунгусской – 0.30, Хетской – 0.27, Бахтинской – 0.20, Мархинской – 0.20, Северо-Сюгджерской – 0.17, Курейской – 0.13, Камовской – 0.40, Непско-Ботуобинской – 0.13, Ангарской – 0.30, Саяно-Енисейской – 0.22, Забайкальской – 0.07, Енисей-Хатангских – 0.25.

В результате применения методов теории вероятности в соответствии с формулами (1)–(9) по пяти видам ГГД, зафиксированных в пределах пятнадцати КС, расположенных на территории ВСП, были произведены расчеты, которые были систематизированы в таблице.

Представленные данные (таблица) могут служить некоторыми вероятностными параметрами, используемыми для прогноза новых НГО в пределах КС на территории ВСП. Результаты использования вероятностных методов обработки для анализа пяти видов ГГД, полученные на территории ВСП, показывают, что наиболее информативными прогнозными параметрами из них являются значения вероятностей, рассчитанных по таким видам ГГД, как: мощность земной коры (H_m), мощность литосферы (H_l), значения геотермальной энергии (Q), мощность осадочного слоя земной коры. Вероятностный параметр, рассчитанный еще по одному виду ГГД, такому как плотность тектонических разломов ($p_{\text{раз}}$), оказался менее информативным. Это связано с тем, что плотность протяженных глубинных тектонических разломов, нормированных на определенную площадь КС, была в пределах всех анализируемых КС примерно одинаковой. Поэтому из-за отсутствия контрастов и достаточно малой величины плотности крупных тектонических разломов этот вид ГГД не всегда позволяет удачно его использовать для вероятностных оценок.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании представлений многих ученых о миграции углеводородных геофлюидов в земную кору из дегазирующей мантии (Кропоткин, 1985; Сывороткин, 2002; Валяев, 2011; Тимурзиев, 2019) необходимо рассмотреть и проверить гипотезу о мантийных плюмах (Eppelbaum, 2007, 2019; Heron, 2019; Eppelbaum et al., 2021; Koppers et al., 2021) как об одном из основных источников дегазации мантии и формирования месторождений abiогенных УВ на территории РФ.

Из ранее проведенных исследований известно, что средняя мощность земной коры по всей территории Земли составляет $H_m \approx 33$ км (Вольвовский и др., 1975). Разницу в значениях сред-

ней мощности земной коры на территории НГО ($H_m \approx 40$ км) и средним значением по территории всей планеты ($H_m \approx 33$ км) можно объяснить следующим образом. Поскольку крупные КС сформированы мантийными плюмами с глубокими «корнями» (Erpelbaum, 2007, 2019; Heron, 2019; Erpelbaum et al., 2021; Koppers, 2021), то обычно под действием повышенного тепломассопереноса мантийного вещества в этих зонах происходит частичное плавление вещества нижней коры и верхней мантии. Вследствие плавления пород происходит некоторое увеличение (объема) мощности земной коры (H_m) и мощности литосферы (H_l) в зонах мантийных плюмов, отличающееся от остальных регионов верхней мантии на территории РФ. Кроме того, следует упомянуть, что через субвертикальные структуры мантийных плюмов происходит дегазация различных геофлюидов (CO_2 , H_2 , углеводороды и др.) из мантии (Валяев, 2011) и постепенное их накапливание в виде залежей углеводородов различного состава в слоях осадочного слоя земной коры (песчаники, карбонаты и другие пористые породы).

На рис. 5 представлен глубинный разрез верхней мантии (Структуры..., 1995), проходящий с СЗ на ЮВ через территорию ВСП от западного побережья полуострова Таймыр до региона расположения Алданского щита. Этот геолого-геофизический разрез показывает глубину проникновения в различные слои верхней мантии Северо-Таймырского, Енисей-Хатангского, Хетского, Анабарского мантийных плюмов.

Видно, что мощность осадочных пород в пределах Северо-Таймырских, Енисей-Хатангских, Хетской КС составляет около 2–3 км, подобно тому, что было зафиксировано в пределах НГО в Южно-Карской КС. Как было показано в различных работах (Смирнова, 1997; Валяев, 2011; Карнюшина, 2015), этой мощности осадочных пород обычно бывает достаточно для формирования залежей углеводородов, при наличии в них слоев с хорошими коллекторскими свойствами (песчаники, карбонатные породы и др.). Однако глубина проникновения в литосферу Хетского мантийного плюма составляет всего около 60 км, что значительно меньше, чем глубина «корневой» части мантийных плюмов в соседнем Ямало-Ненецком нефтегазоносном регионе (например, в Южно-Карской КС) (рис. 5). Поэтому Хетскую КС, несмотря на достаточную мощность осадочных пород, наверное, нельзя считать нефтеперспективной в связи с недостаточностью на этой глубине необходимых термобарических условий для синтеза

рования сложных углеводородов (газоконденсаты, нефть). Малая нефтеперспективность территории Хетской КС подтверждается результатами количественных расчетов, приведенных в таблице.

Если проанализировать более детально особенности исследуемых ГГД на вышеприведенных картах (рис. 1–2), то необходимо обратить внимание, что значительная часть наиболее перспективных КС для поисков УВ (таблица) расположена в зоне увеличенной мощности земной коры (40 ± 4 км) (рис. 1, А) и одновременно в зоне резких (градиентных) изменений мощности верхней мантии от 100 км до 220 км (рис. 1, Б). Резкие изменения мощности верхней мантии на 120 км соответствуют бортовым зонам Восточно-Сибирского геокона.

Данные о глубине поверхности Мохоровичича (рис. 1, А) распределены на фрагменте этой карты крайне неравномерно. Более надежные данные о глубине Мохо (рис. 1, А) в пределах Ангарской КС в виде изолинии 40 км сосредоточены в западной части этой КС. Поэтому западную часть Ангарской КС ($57\text{--}58^\circ$ с. ш., $96\text{--}98^\circ$ в. д.) можно считать более перспективной для постановки детальных ГРП на поиски месторождений УВ. Кроме того, небольшие по размерам Северо-Байкальские КС (16с), расположенные в восточной (бортовой) части Ангарской КС ($54\text{--}56^\circ$ с. ш., 108° в. д.), также могут быть достаточно перспективными по этому виду ГГД. Они не были проанализированы в данной работе из-за своих малых размеров, но о них необходимо упомянуть, чтобы геологоразведчики обратили на них внимание. Противоположная ситуация наблюдается с расположением более перспективных (по значениям вероятности) областей Мохо для поисков месторождений УВ в Саяно-Енисейской КС, которые связаны с ее восточной частью ($55\text{--}57^\circ$ с. ш., $98\text{--}100^\circ$ в. д.). Для Курейской КС характерно, что более надежные данные о глубине поверхности Мохо, равной 40 км, также расположены в ее юго-восточных частях ($64\text{--}65^\circ$ с. ш., $90\text{--}92^\circ$ в. д. и $64\text{--}68^\circ$ с. ш., $92\text{--}95^\circ$ в. д.). Эти части Курейской КС по данному виду ГГД можно считать достаточно перспективными для постановки детальных ГРП. В центральной части ВСП расположена огромная по занимаемой ею территории Тунгусская КС. В пределах Тунгусской КС расположено много КС меньшего диаметра. Эти небольшие КС в северной (64° с. ш., $96\text{--}99^\circ$ в. д.) и западной (62° с. ш., 94° в. д. и 60° с. ш., 96° в. д.) частях в пределах Тунгусской КС по значениям о глубине Мохо обладают достаточной перспективностью для по-

становки ГРП на поиски месторождений УВ. Территория Непско-Ботуобинской КС по этому виду ГГД особенно не выделяется на фоне других КС в пределах ВСП. По уточненным данным, эта КС имеет определенное значение вероятности по данному виду ГГД. Особенно это характерно для ее центральной части у реки Ньюи (13а КС) – так называемой «трубе» дегазации этого мантийного плюма (59–60° с. ш., 114–115° в. д.); это характерно также для западной бортовой части Непско-Ботуобинской КС (56–60° с. ш., 105–106° в. д.). Нефтегазовая перспективность центральной части (13а) Непско-Ботуобинской КС известна. Однако в западной части территории, занимаемой Непско-Ботуобинской КС, пока не обнаружено месторождений УВ. В новых исследованиях, возможно, удастся провести дополнительное, более детальное определение вероятностных параметров локальных КС в

пределах ВСП не только по этому виду ГГД, но и другим видам, а также в западном, слабо изученном секторе Непско-Ботуобинской КС. Другие КС, расположенные в восточной бортовой зоне ВСП, как Бахтинская, имеют по этому параметру (мощность земной коры) определенные перспективы для поисков месторождений УВ, т. к. вся территория КС находится в пределах полуконцентрической изолинии глубины Мохо, равной 40 км. Камовская КС, в отличие от рядом расположенной Бахтинской КС, в целом является не очень перспективной для постановки ГРП на поиски УВ, кроме ее самой северо-восточной части (62° с. ш., 96° в. д.). По данным карты изолиний, глубины до поверхности Мохоровичича (рис. 1, А) Центрально-Анабарской, Оленёкской, Северо-Сюгджерской, Южно-Сюгджерской, Мархинской, Хетской КС, расположенных в пределах

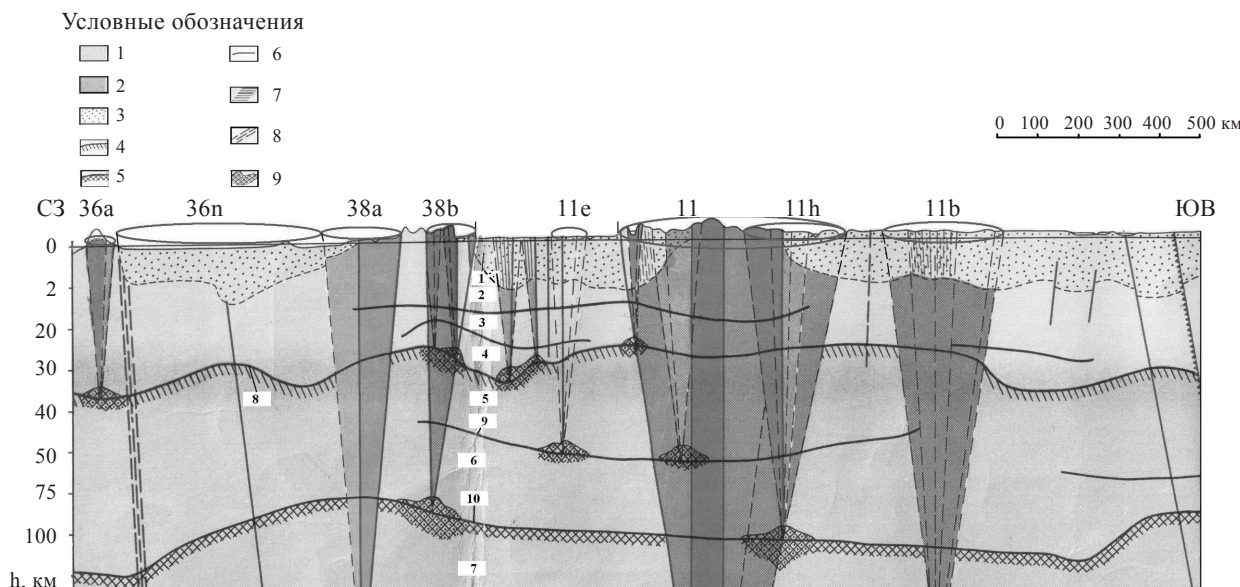


Рис. 5. Глубинный разрез верхней мантии, проходящий через территорию ВСП (Структуры..., 1978).

Номера и название КС: 11 – Анабарская; 11b – Южно-Сюгджерская; 11h – Северо-Сюгджерская; 11e – Хетская; 36a – Новоземельские; 36n – Южно-Карская; 38a – Северо-Таймырские; 38b – Енисей-Хатангские. Условные обозначения: 1 – земная кора; 2 – верхняя мантия; 3 – осадочный чехол; 4 – граница подошвы земной коры; 5 – граница подошвы литосферы; 6 – внутрилitosферные границы; 7 – обозначение зон субдукции; 8 – зоны разломов глубокого проникновения; 9 – энергогенерирующие неоднородности мантии. Название слоев глубинного разреза: 1 – слой осадочной толщи; 2 – «гранито-гнейсовый» слой; 3 – «диоритовый» слой; 4 – «габбро-перидотитовый» слой; 5 – «дунитовый» слой; 6 – «эклогитовый» слой; 7 – «амфиболитовый» слой; 8 – поверхность Мохоровичича; 9 – поверхность, разделяющая «дунитовый» и «эклогитовый» слои верхней мантии; 10 – поверхность, разделяющая «эклогитовый» и «амфиболитовый» слои верхней мантии.

Fig. 5. Upper mantle deep section passing through the East Siberian Platform area (Structures..., 1978).

CS numbers and name: 11 – Anabar; 11b – Yuzhno-Syugdzherskaya; 11h – Severo-Syugdzherskaya; 11e – Khetskaya; 36a – Novaya Zemlya; 36n – Yuzhno-Karskaya; 38a – Severo-Taimyr; 38b – Yenisey-Khatanga. Legend: 1 – Earth's crust; 2 – upper mantle; 3 – sedimentary cover; 4 – boundary of the Earth's crust bottom; 5 – boundary of the lithosphere bottom; 6 – intra-lithospheric boundaries; 7 – subduction zones; 8 – deep penetration fault zones; 9 – energy-generating mantle heterogeneities. Deep section layers: 1 – sedimentary layer; 2 – «granite-gneiss» layer; 3 – «diorite» layer; 4 – «gabbro-peridotite» layer; 5 – «dunite» layer; 6 – «eclogite» layer; 7 – «amphibolite» layer; 8 – Moho discontinuity; 9 – surface separating the «dunite» and the «eclogite» layers of the upper mantle; 10 – surface separating the «eclogite» and the «amphibolite» layers of the upper mantle.

Анабарской антеклизы, являются малоперспективными КС для постановки детальных ГРП на поиски месторождений нефти и газа. Забайкальскую КС также можно считать не очень перспективной по этому виду ГГД для постановки детальных ГРП. По уточненным данным этого вида ГГД, некоторую перспективность для поисков УВ может иметь восточный сектор Забайкальской КС ($51.5-53^\circ$ с. ш., $108-113^\circ$ в. д.), примыкающий к центральной части восточного борта оз. Байкал. Небольшие по размерам Енисей-Хатангские КС, расположенные в юго-восточной части Таймырского астенотрона, по данным вышеприведенной карты (рис. 1, А) и глубинного разреза (рис. 5), не имеют большой перспективы для поисков месторождений УВ. Однако проведенный анализ одного вида ГГД не может служить объективным критерием для прогноза новых НГО. В связи с этим ниже необходимо рассмотреть и результаты других ГГД.

По данным карты глубинных тектонических разломов (Ананьева и др., 1977; Беляевский, 1981) и построенных по этим данным графикам теоретической плотности распределения (рис. 4, Б), не удастся выделить какие-то особенные КС, т. к. плотность тектонических разломов на всей территории ВСП примерно одинаковая. Исключение составляют Непско-Ботуобинская, Ангарская, Саяно-Енисейская, Бахтинская КС с несколько повышенной плотностью тектонических разломов.

По данным оцифрованной карты значений геотермического градиента, нефте- и газоперспективными КС на территории севера ВСП являются Енисей-Хатангские, а также Ангарская, западная часть Саяно-Енисейской, Забайкальская, Непско-Ботуобинская, расположенные в южной и юго-восточной частях ВСП, где наблюдаются достаточно высокие значения этого вида ГГД.

По данным повышенных значений мощности осадочного слоя (рис. 2, А), нефте- и газоперспективными КС на территории ВСП можно считать Оленёкскую, Курейскую, Тунгусскую, Хетскую, Камовскую, Ангарскую, Саяно-Енисейскую КС с относительно повышенной мощностью осадочных пород. По данным ГРП, мощность осадочных пород в пределах территории Курейской КС в среднем составляет 5.5 км (рис. 6).

В центральной части Курейского мантийного плюма, в «трубе» его дегазации, расположенной в зоне Туринской впадины, мощность слоя осадочных пород достигает 7 км. Об остальных КС, кроме вышеперечисленных, можно сказать, что они в целом находятся на грани перспективных и бесперспективных из-за небольших значений мощности осадочных пород в среднем по всей площади КС. Однако в пределах этих КС имеются отдельные относительно небольшие впадины с достаточно мощным слоем осадочных пород, которые могут быть перспективны для постановки детальных ГРП на нефть и газ.

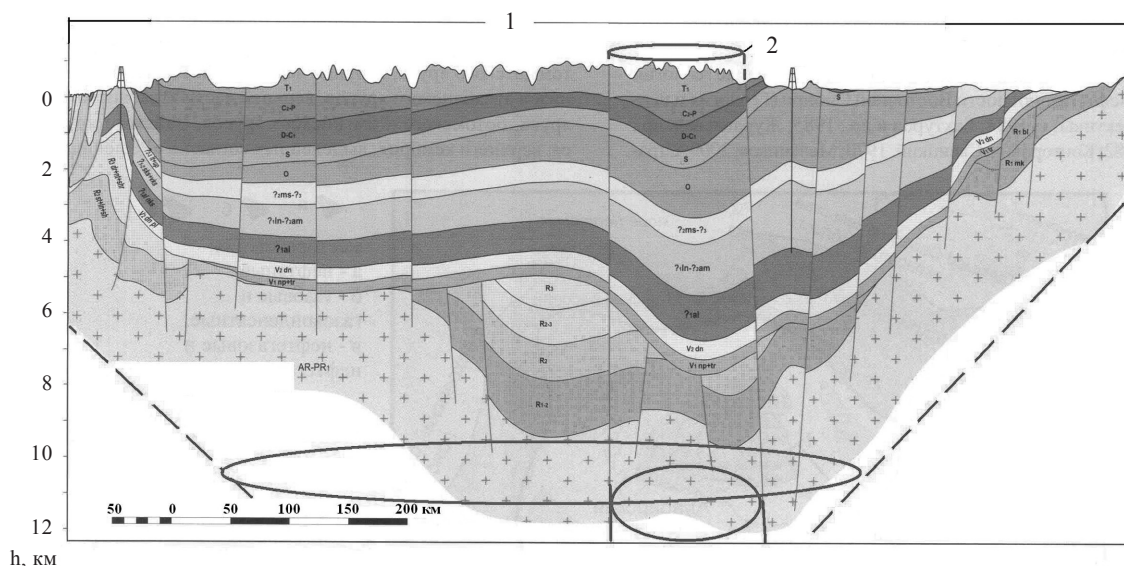


Рис. 6. Геолого-геофизический разрез через территорию Курейского геокона (Карнюшина и др., 2015). 1 – территория, занимаемая Курейским геоконом; 2 – Туринская КС – верхняя часть «трубы» дегазации Курейского геокона.

Fig. 6. Geological and geophysical section through of the Kureysky geocon area (Karnyushina et al., 2015). 1 – Kureysky geocon area; 2 – Turinskaya CS, the upper part of the Kureysky geocon gas-draining “pipe.”

В результате количественного анализа, выполненного с использованием вероятностных методов обработки данных по пятнадцати КС на территории ВСП и по пяти различным видам исследуемых ГГД, можно сказать, что достаточно перспективными КС являются Непско-Ботуобинская, Ангарская, Саяно-Енисейская. По результирующим данным таблицы, Курейскую, Тунгусскую, Бахтинскую, Камовскую, Енисей-Хатангские, Забайкальскую КС можно считать обладающими лишь некоторой относительной перспективностью для постановки детальных ГРП по некоторым из секторов этих КС, для поисков отдельных месторождений нефти и газа.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены результаты применения вероятностных методов обработки статистических данных, использованные для прогноза нефтегазовой перспективности территорий пятнадцати КС на территории ВСП, полученных по данным пяти различных видов ГГД.

2. По данным пяти видов ГГД на территории Восточно-Сибирского геокона из пятнадцати проанализированных КС выделено три наиболее перспективных на наличие в них залежей углеводородов (Непско-Ботуобинская, Ангарская, Саяно-Енисейская). Еще шесть КС на территории ВСП (Курейскую, Тунгусскую, Бахтинскую, Камовскую, Енисей-Хатангские, Забайкальскую) можно считать только относительно перспективными для постановки детальных ГРП для поисков месторождений нефти и газа. По проведенным расчетам, остальные шесть КС являются малоперспективными для поисков УВ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор искренне благодарит докторов геолого-минералогических наук А. И. Тимурзиева, Р. Б. Сейфуль-Мулюкова, В. Л. Сывороткина – организаторов ежегодных конференций «Кудрявцевские чтения» за их огромную работу по организации этих конференций и за возможность проанализировать замечания, поступившие при изложении докладов, и в результате устранить недостатки настоящей статьи. Автор также искренне благодарит рецензентов журнала за ценные советы, которые позволили значительно улучшить качество данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

Ананьева Е. М., Беляев И. В., Головин И. В. Схема зон глубинных разломов территории СССР, масштаб 1 : 10 000 000. Ленинград : ВСЕГЕИ, 1977. 1 л.

Беляевский Н. А. Строение земной коры континентов по геолого-геофизическим данным. Москва : Недра, 1981. 431 с.

Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. Москва : Мир, 1974. 464 с.

Брюханов В. Н., Глуховский Н. З., Ставцев А. Л. Кольцевые структуры Земли // Природа. 1977. № 10. С. 54–65.

Валяев Б. М. Углеродородная дегазация Земли, геотектоника и происхождение нефти и газа (признание и развитие идей П. Н. Кропоткина) // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений : Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения П. Н. Кропоткина. Москва : ГЕОС, 2011. С. 10–32.

Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Москва : Наука, 1969. 250 с.

Вольвовский И. С., Вольвовский Б. С. Разрезы земной коры территории СССР по данным глубинного сейсмического зондирования. Москва : Советское радио, 1975. 267 с.

Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике. Справочник геофизика / Ред. В. И. Дмитриев. Москва : Недра, 1982. 222 с.

Гаврилов С. В. Проникновение теплового диатерма в континентальную литосферную плиту из не-ньютоновской верхней мантии // Физика Земли. 1994. № 7–8. С. 18–26.

Закиров А. Ш., Харитонов А. Л. Глубинное строение и перспективы нефтегазоносности Северного Устьюрта // Глубинная нефть. 2014. Т. 2. № 11. С. 1759–1771. URL: http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-2-11-2014/7_Zakirov-Kharitonov_2-11-2014.pdf (дата обращения 01.12.2014).

Карноушина Е. Е., Коробова Н. И., Фролов С. В., Бакай Е. А., Ахманов Г. Г., Крылов О. В. Седиментационный контроль нефтегеологических свойств вендско-кембрийских формаций севера Лено-Тунгусского бассейна // Георесурсы. 2015. Т. 61. № 2. С. 28–40.

Карта геотермальных ресурсов России. Масштаб 1 : 30 000 000 / Ред. А. А. Смыслов. Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 1995. 1 л.

Кац Я. Г., Полетаев А. И., Сулиди-Кондратьев Е. Д. Кольцевые структуры лика планеты. Москва : Знание, 1989. 48 с.

Кропоткин П. Н. Дегазация Земли и происхождение углеводородов // Бюллетень Московского общества испытателей природы. 1985. Т. 60. № 6. С. 3–18.

Кулаков А. П. Морфоструктуры востока Азии. Москва : Наука, 1986. 150 с.

Никитин А. А. Статистические методы выделения геофизических аномалий. Москва : Недра, 1979. 280 с.

Пиковский Ю. И. Труды Д. И. Менделеева о минеральном происхождении нефти (современное прочтение) // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений : Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения П. Н. Кропоткина. Москва : ГЕОС, 2011. С. 189–230.

Свейников А. А. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций. Москва : Наука, 1970. 656 с.

Сейфуль-Мулюков Р. Б. Нефть и газ. Глубинная природа и ее прикладное значение. Москва : Торус Пресс, 2012. 216 с.

Смирнова М. Н. Нефтегазоносные кольцевые структуры и научно-методические аспекты их изучения // Геология нефти и газа. 1997. № 9. С. 35–40.

Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа / Ред. В. В. Соловьев. Ленинград : ВСЕГЕИ, 1978. 70 с.

Сывороткин В. Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. Москва : Геоинформцентр, 2002. 250 с.

Тимурзиев А. И. Миф «энергетического голода» от Хабберта и пути воспроизводства ресурсной базы России на основе реализации проекта «Глубинная нефть» // Бурение и нефть. 2019. № 1. С. 12–20.

Хаин В. Е. Загадки кольцевых структур // Основные проблемы современной геологии. Москва : Научный мир, 2003. С. 242–259.

Чермак В. Геофизические поля, их природа и геологическая интерпретация // Геодинамика. 1986. Т. 5. № 2. С. 111–256.

Eppelbaum L. V. Geophysical potential fields : Geological and environmental applications. Amsterdam ; New York : Elsevier, 2019. 460 p.

Eppelbaum L. V. Localization of ring structures in Earth's environments // Journal of the Archaeological Society of the Slovakian Academy of Sciences, Special Issue : Archaeological Prospection. 2007. Vol. XLI. P. 145–148.

Eppelbaum L. V. Theories of probability, information, and graphs in applied geophysics // Prime Archives in Applied Mathematics. Vide Leaf / Ed. K. Kyamakya. 2020. P. 1–35.

Eppelbaum L. V., Zvi B. A., Katz Y., Cloetingh S., Kaban M. K. Giant quasi-ring mantle structure in the African-Arabian junction : Results derived from the geological-geophysical data integration // Geotectonics. 2021. Vol. 55. No. 1. P. 58–82. DOI: 10.1134/S0016852121010052.

Heron P. J. Mantle plumes and mantle dynamics in the Wilson cycle // Geological Society Special Publication. 2019. Vol. 470. No. 1. P. 87–103.

Koppers A. A. P., Konrad K., Becker T. W., Jackson M. G., Müller R. D., Romanowicz B., Steinberger B., Whittaker J. M. Mantle plumes and their role in Earth processes // Nature Reviews Earth and Environment. 2021. Vol. 2. No. 6. P. 382–401.

Larson R. L. Mantle plumes control magnetic reversal frequency // Earth and Planetary Science Letters. 1991. Vol. 107. P. 437–447.

Поступила в редакцию 22.08.2023.

Поступила после доработки 06.10.2023.

USING PROBABILISTIC METHODS FOR PROCESSING GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL DATA IN THE EAST SIBERIAN PLATFORM AREA FOR FORECASTING OIL AND GAS PROSPECTS OF CONCENTRIC STRUCTURES

A. L. Kharitonov

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, RAS, Moscow

The study aims in showing the results of forecasting oil and gas prospects of some concentric structures in the East Siberian Platform area. The research was conducted using probabilistic data processing methods based on the use of preliminary analysis of various geological and geophysical data (histograms of the thickness of the Earth's crust, lithosphere, sedimentary layer, geothermal gradient, density of tectonic faults), evaluated for the main oil and gas basins in the Russian Federation. The results obtained were used to forecast oil and gas prospects of concentric structures in the East Siberian Platform area. In particular, probabilistic processing methods using five geological and geophysical types of data in the region were used to calculate probability values for fifteen different concentric structures. The results of using probabilistic methods for processing various types of geological and geophysical data, measured within several concentric structures on the territory of the East Siberian Platform are considered. According to the calculated probability values, the areas of three concentric structures (Nepsko-Botuobinskaya, Angarskaya, Sayano-Yeniseyskaya), located in the south of the East Siberian Platform promising for the search for new areas with hydrocarbon deposits, were predicted. Six other concentric structures (Kureyskaya, Tungusskaya, Bakhtinskaya, Kamovskaya, Yenisey-Khatangsk, Zabaikalskaya) require more comprehensive geological prospecting, as their individual sectors may be promising for oil and gas exploration.

Keywords: probabilistic methods, East Siberia, geophysical data, concentric structures, hydrocarbon deposits.

REFERENCES

- Ananyeva, E. M., Belyaev, I. V., Golovin, I. V., 1977. Scheme of Deep Fault Zones of the USSR Territory, Scale 1 : 10 000 000. Leningrad, VSEGEI [In Russian].
- Belyaevsky, N. A., 1981. Structure of the Earth's Crust of the Continents According to Geological and Geophysical Data. Moscow, Nedra [In Russian].
- Bendat, J., Piersol, A., 1974. *Measurement and Analysis of Random Data*. Moscow, Mir [In Russian].
- Bryukhanov, V. N., Glukhovskiy, N. Z., Stavtsev, A. L., 1977. Ring Structures of the Earth, *Priroda*. 10, 54–65 [In Russian].
- Chermak, V., 1986. Geophysical Fields, Their Nature, and Geological Interpretation, *Geodynamika*. 5 (2), 111–256 [In Russian].
- Computational Mathematics and Engineering in Exploration Geophysics. Handbook of Geophysicist, 1982. Ed. V. I. Dmitriyev. Moscow, Nedra [In Russian].
- Eppelbaum, L. V., 2019. Geophysical Potential Fields : Geological and Environmental Applications. Amsterdam ; New York, Elsevier.
- Eppelbaum, L. V., 2007. Localization of Ring Structures in Earth's Environments, *Journal of the Archaeological Society of the Slovakian Academy of Sciences, Special Issue : Archaeological Prospection*. XLI, 145–148.
- Eppelbaum, L. V., 2020. Theories of Probability, Information, and Graphs in Applied Geophysics, *Prime Archives in Applied Mathematics. Vide Leaf*. Ed. K. Kyamakya. 1–35.
- Eppelbaum, L. V., Zvi, B. A., Katz, Y., Cloetingh, S., Kaban, M. K., 2021. Giant Quasi-Ring Mantle Structure in the African-Arabian Junction : Results Derived from the Geological-Geophysical Data Integration, *Geotectonics*. 55 (1), 58–82. DOI: 10.1134/S0016852121010052.
- Gavrilov, S. V., 1994. Penetration of the Thermal Diapir into the Continental Lithospheric Plate from the Non-Newtonian Upper Mantle, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 7–8, 18–26 [In Russian].
- Heron, P. J., 2019. Mantle Plumes and Mantle Dynamics in the Wilson Cycle, *Geological Society Special Publication*. 1 (470), 87–103.
- Karnyushina, E. E., Korobova, N. I., Frolov, S. V., Bakai, E. A., Akhmanov, G. G., Krylov, O. V., 2015. Sedimentation Control of the Oil Geological Properties of the Vendian-Cambrian Formations in the North of the Lena-Tunguska Basin, *Georesursy*. 2 (61), 28–40 [In Russian].
- Kats, Ya. G., Poletayev, A. I., Sulidi-Kondratyev, E. D., 1989. Ring Structures on the Face of the Planet. Moscow, Znaniye [In Russian].
- Khain, V. E., 2003. Enigmatic Ring Structures, *Main Problems of Modern Geology*. Moscow, Scientific World, 242–259 [In Russian].
- Koppers, A. A. P., Konrad, K., Becker, T. W., Jackson, M. G., Müller, R. D., Romanowicz, B., Steinberger, B., Whittaker, J. M., 2021. Mantle Plumes and Their Role in Earth Processes, *Nature Reviews Earth and Environment*. 2 (6), 382–401.
- Kropotkin, P. N., 1985. Earth Gas Drainage and the Origin of Hydrocarbons, *Bulletin of Moscow Society of Naturalists*. 60 (6), 3–18 [In Russian].
- Kulakov, A. P., 1986. Morphological Structures in the East of Asia. Moscow, Nauka [In Russian].
- Larson, R. L., 1991. Mantle Plumes Control Magnetic Reversal Frequency, *Earth and Planetary Science Letters*. 107, 437–447.
- Map of Russia's Geothermal Resources, 1995. Scale 1 : 30 000 000. Ed. A. A. Smyslov. St. Petersburg, VSEGEI [In Russian].
- Nikitin, A. A., 1979. Statistical Methods for the Identification of Geophysical Anomalies. Moscow, Nedra [In Russian].
- Pikovskiy, Yu. I., 2011. D. I. Mendeleev's Works on the Mineral Origin of Oil (Modern Reading), *Degassing of the Earth and the Genesis of Oil and Gas Fields : Proceedings of the All-Russian with International Participation Conference, Devoted to the Centenary of P. N. Kropotkin*. Moscow, GEOS, 189–230 [In Russian].
- Seyful-Mulyukov, R. B., 2012. Oil and Gas. Deep Nature and Its Applied Significance. Moscow, Torus Press [In Russian].
- Smirnova, M. N., 1997. Oil and Gas Ring Structures and Scientific-Methodological Aspects of Their Investigation, *Geology of Oil and Gas*. 9, 35–40 [In Russian].
- Structures of the Central Type in the Territory of the USSR According to Geological and Geomorphological Analysis, 1978. Ed. V. V. Solovyov. Leningrad, VSEGEI [In Russian].
- Sveshnikov, A. A., 1970. Collection of Problems on Probability Theory, Mathematical Statistics, and Theory of Random Functions. Moscow, Nauka [In Russian].
- Syvorotkin, V. L., 2002. Deep Gas Drainage of the Earth and Global Catastrophes. Moscow, Geoinformcentre [In Russian].
- Timurziev, A. I., 2019. Myth of Power Hunger from Habbert and Ways of the Decision of the Global Power Problem on Base of "Deep Oil" Project Realization, *Drilling and Oil*. 1, 12–20 [In Russian].
- Valyaev, B. M., 2011. Hydrocarbon Degassing of the Earth, Geotectonics and the Origin of Oil and Gas (Recognition and Development of the Ideas of P. N. Kropotkin), *Degassing of the Earth and the Genesis of Oil and Gas Fields : Proceedings of the All-Russian with International Participation Conference, Devoted to the Centenary of P. N. Kropotkin*. Moscow, GEOS, 10–32 [In Russian].
- Volvovsky, I. S., Volvovsky, B. S., 1975. Sections of the Earth's Crust in the USSR Territory According to Deep Seismic Sounding Data. Moscow, Soviet Radio [In Russian].
- Wentzel, E. S., 1969. Probability Theory. Moscow, Nauka [In Russian].
- Zakirov, A. Sh., Kharitonov, A. L., 2014. Deep Structure and Prospects of Oil-and-Gas Content of Northern Ustyurt, *Deep Oil*. 2 (11), 1759–1771. URL: http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-2-11-2014/7_Zakirov-Kharitonov_2-11-2014.pdf (accessed 01.12.2014) [In Russian].