

УДК 553.981/982:551.24.054

ГЕОТЕРМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ПРЕДЪЕНИСЕЙСКОГО ОСАДОЧНОГО БАССЕЙНА

Дульцев Федор Федорович¹,
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Новиков Дмитрий Анатольевич^{1,2},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

Актуальность работы связана с тем, что пластовые температуры являются одним из основных факторов, контролирующих степень преобразованности рассеянного органического вещества горных пород, газо- и нефтеобразования, формирования и сохранения залежей углеводородов. Именно от температуры зависят физико-химические свойства и фазовое состояние газов, нефти и воды в пластовых условиях. Верхнедевонско-палеозойские отложения Предъенисейского осадочного бассейна рассматриваются в последние годы как один из возможных объектов для прироста ресурсной базы углеводородов в пределах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. В настоящее время изучаемый регион крайне слабо изучен бурением, поэтому в настоящей работе предложена геотермическая модель, показывающая характер изменения пластовых температур с глубиной и позволяющая прогнозировать тенденции изменения температуры на труднодоступных объектах, слабо обеспеченных фактическими данными.

Цель работы: выявление геотермических особенностей верхнедевонско-палеозойских отложений Предъенисейского осадочного бассейна; районирование и составление геотермической модели осадочного выполнения бассейна.

Методы исследования. Рассчитаны геотермические параметры геологического разреза, выполнено геотермическое районирование территории по величине геотермического градиента. С использованием структурных карт по основным стратиграфическим горизонтам и регрессионных зависимостей геотермических параметров с глубиной с использованием специализированных программных пакетов GridBuilder и GridMaster, а также GS Surfer были созданы сеточные модели (Grid).

Результаты. Установлено, что как по формационному составу, так и по своим геотермическим условиям разрезы верхнедевонско-палеозойских отложений Предъенисейского осадочного бассейна сопоставимы с западными районами Сибирской платформы и характеризуются пониженными геотермическими градиентами (1,25–2,55 °C/100 м). Впервые составлена детальная геотермическая модель осадочного выполнения бассейна, позволяющая прогнозировать геотермические условия недр.

Ключевые слова:

Предъенисейский осадочный бассейн, геотермическая зональность, геотермический градиент, пластовые температуры, геотермическая модель.

Введение

Предъенисейский осадочный бассейн (ПОБ), расположенный в юго-восточной части Западной Сибири и представляющий собой верхнепротерозойско-нижнепалеозойский комплекс чехольных образований выделенного здесь Касско-Туруханского микроконтинента, погруженных под мезозойско-кайнозойские осадки Западно-Сибирской геосинеклизы, в последние годы рассматривается как один из перспективных регионов прироста ресурсов углеводородов (УВ) в Сибири [1, 2] (рис. 1). Изучаемый регион характеризуется переходным типом кембрийских отложений: с запада на восток бессолевого тип разреза меняется на соленосный, характерный для хорошо изученных районов запада Сибирской платформы [3, 4].

Надо отметить, что по геологическому строению и условиям седиментации Предъенисейский бассейн очень близок с неопротерозойско-нижнепалеозойским Сычуанским осадочным бассейном (Южно-Китайская платформа), где китайскими геологами недавно были открыты гигантские газовые месторождения [5, 6]. Существенным отличием (с точки зрения потенциальной нефтегазоносности)

является лишь то, что синийские и нижнекембрийские нефтематеринские комплексы последнего (формации Доушаньто и Дэнъин, Цюнчжусы и Майдипин) испытали погружение и достигли зоны нефтеобразования лишь в триасовое и юрское время [5]. При этом перекрывающие их нижнепалеозойские карбонатные (рифогенные) толщи, в которых образовались скопления сгенерированных (и мигрированных) углеводородов, не были денудированы в последующие эпохи, а лишь испытали складчатые деформации. В Предъенисейском процессе генерации проходили уже в венде и раннем палеозое, при этом в триасе потенциальные залежи могли быть подвергнуты масштабной деструкции, а большая часть палеозойского разреза на поднятиях денудирована [2].

Пластовые температуры являются одним из основных факторов, определяющих степень реализации нефтегазогенерационного потенциала: преобразованности рассеянного органического вещества горных пород, протекания процессов газо- и нефтеобразования, миграции, аккумуляции и деградации УВ. С 1960-х гг. в мире активно развивается направление по изучению геотермических особен-

ностей осадочных бассейнов [7–10], применение геотермических данных и изучении гидродинамических особенностей разреза [11]. Велика роль геотермического блока исследований при реализации проектов альтернативной энергетики, связанных с термальными водами [12–15]. От температуры зависят физико-химические свойства и фазовое состояние газов, нефти и воды в пластовых условиях [16, 17]. Геотермические исследования в Западной Сибири ведутся более 60 лет. За этот период выполнено значительное число исследований, как теоретического характера, так и с целью прикладного использования геотермической информации для решения различных проблем гидрогеологии, тектоники и нефтяной геологии региона. Их результаты отражены в многочисленных трудах Г.Д. Гинсбурга, А.Д. Дучкова, Ю.Г. Зимина, Л.М. Зорькина, А.Э. Конторовича, В.А. Кошляка, Н.М. Кругликова, А.Р. Курчикова, Б.Ф. Маврицкого, И.И. Нестерова, Б.П. Ставицкого, Э.Э. Фотиади, Г.А. Череменинского и многих других исследова-

телей. Первые региональные карты температур осадочного чехла на всю территорию Западно-Сибирского бассейна были построены в 1967 г. Ю.Г. Зиминим, А.Э. Конторовичем, Л.И. Швыдкой. Позднее такие построения выполнялись неоднократно (В.И. Ермаков, А.Э. Конторович, Н.М. Кругликов, Б.П. Ставицкий, В.А. Скоробогатов, и др.). Наиболее полные сводки содержатся в многочисленных работах А.Э. Конторовича, А.Р. Курчикова, И.И. Нестерова и других.

Изученность геотермических условий ПОБ крайне неоднородна. С начала 2000-х гг. в его пределах был реализован проект параметрического бурения «Восток», в результате которого было пробурено три скважины: Восток-1, Восток-3 и Восток-4, и вскрыты глубокопогруженные горизонты верхнепротерозойских и нижнепалеозойских отложений. Новые геотермические материалы вместе с проведенными ранее исследованиями [18, 19] с обобщением геологоразведочных работ прошлых лет позволили по-новому взглянуть на геотермиче-

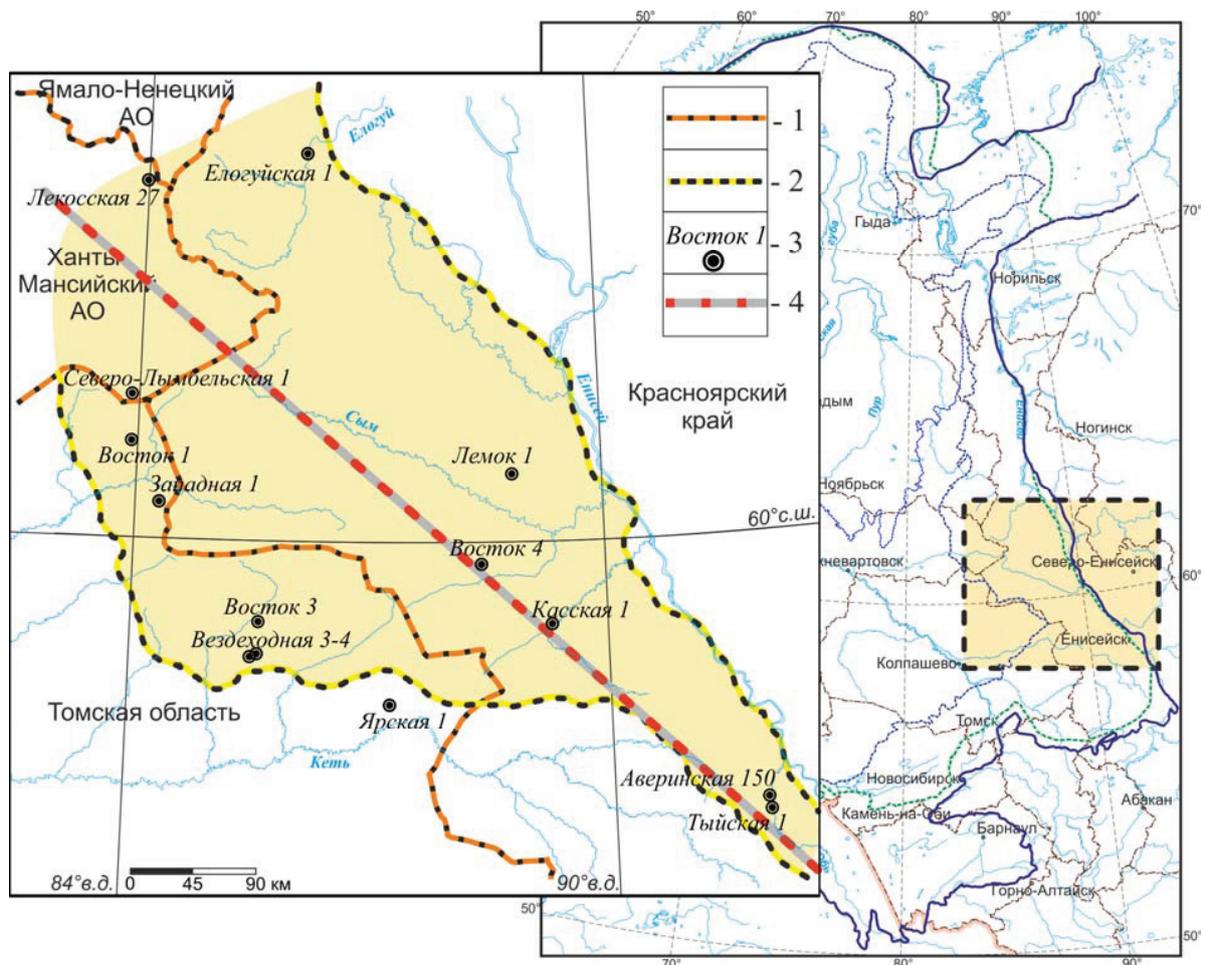


Рис. 1. Местоположение района исследований в пределах Западной Сибири. Границы: 1 – административные; 2 – Предьенисейского осадочного бассейна; 3 – название поисковой площадки и номер скважины; 4 – линия геотермического разреза (рис. 4)

Fig. 1. Location of the studied area within West Siberia. 1 are the administrative boundaries; 2 are the basin limits; 3 are the key wells; 4 is the geothermal section line (Fig. 4)

ские особенности недр изучаемого региона и впервые составить ее геотермическую модель. Фактический материал по Предъенисейскому бассейну и прилегающим территориям представлен результатами испытаний в 197 объектах 56 глубоких скважин, а также данными термометрии (ГИС), выполненной в рамках проекта «Восток». При геотермических исследованиях был привлечен весь имеющийся фактический материал по результатам испытания скважин южной части Западно-Сибирского осадочного бассейна.

В настоящем исследовании решались три задачи в соответствии с целями исследования – построение комплекта карт пластовых температур, построение карт геотермических градиентов и составление геотермической модели. При составлении карт пластовых температур по основным стратиграфическим уровням была принята методика, основы которой были заложены А.Э. Конторовичем, А.Р. Курчиковым, И.И. Нестеровым, Б.П. Ставицким в 60–70-е гг. прошлого столетия. Был создан банк всех имеющихся геотермических материалов, и выполнена их разбровка по степени достоверности. На основе имеющихся материалов были рассчитаны геотермические параметры (геотермический градиент и ступень) геологического разреза, которые были положены в основу геотермического районирования территории по величине геотермического градиента. Далее с использованием структурных карт по основным стратиграфическим горизонтам [1, 20] и регрессионных зависимостей геотермических параметров с глубиной были созданы сеточные модели (Grid) с использованием специализированных программных пакетов GridBuilder и GridMaster (разработка В.А. Лапковского, ИНГГ СО РАН), а также GS Surfer. Финальная корректировка карт современных температур пород мезозоя, палеозоя и верхней части протерозоя проводилась с учетом фактических замеров в скважинах.

Результаты проведенных в последние годы геолого-геофизических исследований (в том числе в рамках подпрограммы «Восток» разработанной в 2004 г. под руководством А.Э. Конторовича) свидетельствуют о том, что в левобережье Енисея на юго-востоке Западной Сибири под мезозойскими отложениями получил развитие мощный Предъенисейский неопротерозойско-нижнепалеозойский осадочный бассейн (рис. 1) [1]. Площадь его наиболее изученной южной части составляет около 190 тыс. км², а объем осадочного выполнения – около 1 млн км³. Благодаря этим работам была существенно уточнена и детализирована геологическая модель, стратиграфия и геодинамическая эволюция бассейна [1, 2, 20–23].

Результаты исследований и их обсуждение

В структуре геотермического поля в основании осадочного чехла Западной Сибири установлена определенная геотермическая зональность. При детальном анализе выявлено несколько геотерми-

ческих зон, которые имеют непосредственную связь с возрастом консолидации доюрских комплексов Западно-Сибирской плиты. На одной из первых схем, составленной Н.Н. Ростовцевым с соавторами [24], выделены структурно-тектонические зоны, прошедшие разновозрастные эпохи складчатости: байкальскую, салаирскую, каледонскую и герцинскую. Также на схеме показаны докембрийские жесткие массивы, существование которых предполагается по геофизическим данным. Позже в работах В.С. Суркова с соавторами [25] была выделена приуральская область складчатости как продолжение структур Горного Урала, погребенных под чехлом Западно-Сибирской геосинеклизы, то есть восточная часть уралид (уральская ветвь герцинид). В этой же работе на основании геологических и геофизических материалов были установлены особенности строения основных структурно-тектонических зон и доказано существование мегацикличности в эволюции земной коры Западной Сибири (чередование деструктивной и конструктивной стадий).

Анализ показал, что по величине геотермического градиента Предъенисейский осадочный бассейн характеризуется пониженными значениями геотермического градиента (1,25–2,55 °С/100 м) по сравнению с центральными и в большей степени западными районами Западно-Сибирской геосинеклизы (рис. 2, а).

Таблица. Геотермическая характеристика Предъенисейского осадочного бассейна

Table. Geothermal characteristics of the Fore-Yenisei sedimentary basin

Стратиграфический интервал Stratigraphic level	Западные районы West region				Восточные районы East region			
	Тпл/Trpl, °С		Г/Gr, °С/100 м (м)	G, м (м)/°С	Тпл/Trpl, °С		Г/Gr, °С/100 м (м)	G, м (м)/°С
	от from	до to			от from	до to		
мезозой mesozoic	45	86	2,55	39,28	19	44	2,43	41,22
верхний кембрий upper cambrian	44	86	2,39	41,83	44	68	2,23	44,93
средний кембрий middle cambrian	68	104	2,24	44,68	68	74	1,62	61,78
нижний кембрий lower cambrian	74	95	1,93	51,83	74	95	1,52	65,60
верхний венд vendian	96	103	1,81	55,20	•	•	•	•
верхний неопротерозой–нижний венд upper neoproterozoic–low vendian	103	113	1,25	79,94	•	•	•	•

«•» отсутствие данных/lack of data

В разрезе осадочного чехла обособляются две геотермические зоны: мезозойская часть разреза является наиболее разогретой, а верхнепротерозойская – холодной (таблица, рис. 2, б). Для мез-

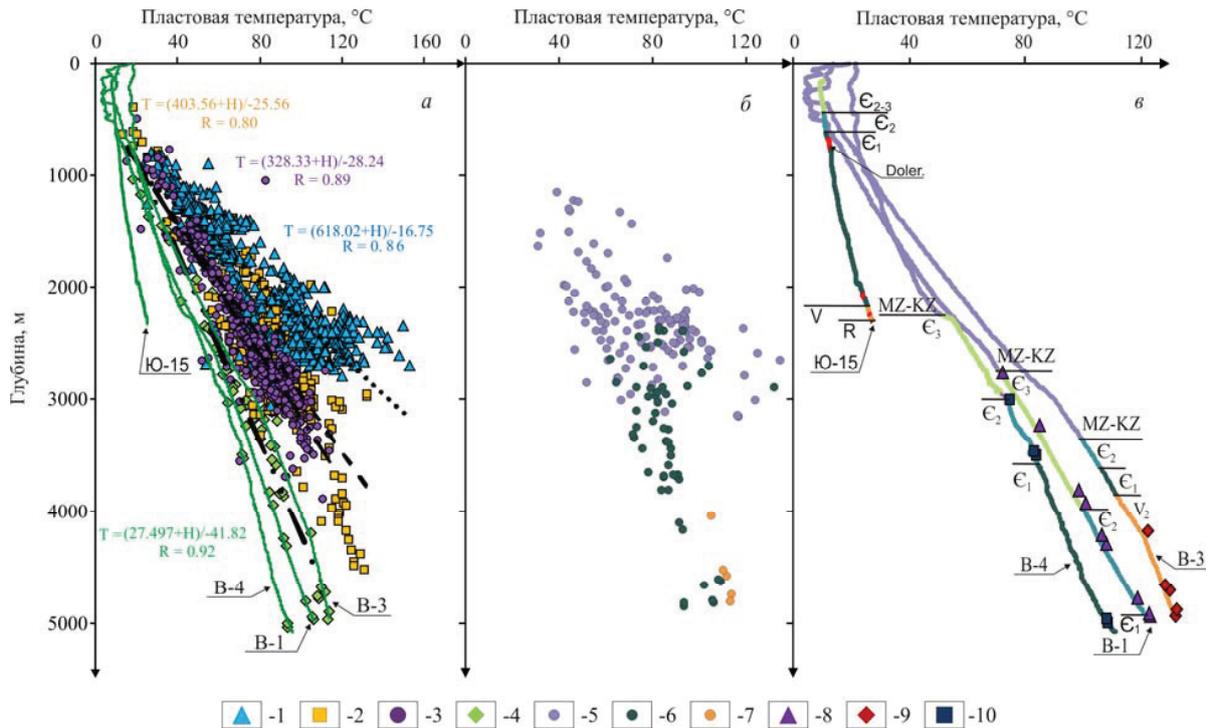


Рис. 2. Типы вертикальной геотермической зональности ряда геологических структур Западной Сибири и прилегающих районов Сибирской платформы (а), Предьенисейского осадочного бассейна (б) и изменение пластовых температур с глубиной в скважинах: Восток-1, Восток-3, Восток-4 и Юрубченская-15 (Сибирская платформа) (в). Замеры пластовых температур в пределах районов Западной Сибири: а) 1 – западных; 2 – юго-восточных; 3 – центральных; 4 – Предьенисейского осадочного бассейна; б) 5 – мезозоя, 6 – палеозоя, 7 – верхнего протерозоя; в) точечных замеров в скважинах: 8 – Восток-1; 9 – Восток-3; 10 – Восток-4

Fig. 2. Vertical geothermal patterns of: a) geologic structures in West Siberia and Siberian Craton adjacent areas; b) study area; c) change in formation temperatures with depth in the wells: Vostok-1, 3, 4 and Yurubchenskaya-15 (Siberian Craton). Formation temperature survey in the regions of West Siberia: a) 1 – western, 2 – southeastern, 3 – central, 4 – Fore-Yenisei sedimentary basin; b) 5 – Mesozoic, 6 – Paleozoic, 7 – Upper Proterozoic; c) spot measurements in the wells: 8 – Vostok-1, 3, 4

озойских отложений геотермические градиенты варьируют в интервале 2,20–2,55 °С/100 м. С глубиной их величина существенно снижается от 2,23–2,39 °С/100 м в отложениях верхнего кембрия до 1,25–1,81 °С/100 м – в венде.

Латеральное распределение пластовых температур и характеристик геотермического поля также подчиняется определённым закономерностям. Так, для положительных структур в западной части осадочного бассейна отмечаются повышенные значения геотермических градиентов, составляющие до 2,55 °С/100 м в мезозое и до 1,93 °С/100 м в отложениях нижнего кембрия. Другая зона, расположенная в центральной части бассейна, характеризуется пониженными значениями градиентов до 2,43 °С/100 м в мезозойской части разреза и до 1,52 °С/100 м в нижнем кембрии. В восточном направлении происходит значительное снижение величин теплового потока и характеристик геотермического поля.

В целом регион характеризуется переходным типом геотермического разреза между Западно-Сибирским и Тунгусским (Сибирская платформа) осадочными бассейнами. Этот факт подтверждается новыми геотермическими данными по скважи-

нам проекта «Восток», что значительно повышает достоверность нашей геотермической модели (рис. 2, в).

Для мезозойских отложений западных районов бассейна пластовые температуры изменяются от 45 до 86 °С, снижаясь до 19–45 °С в восточных (рис. 3, а). Геотермические градиенты варьируют от 2,55–2,95 °С/100 м в районе скважин Восток-1 и Восток-3 до 2,25–2,43 °С/100 м в районе скважины Восток-4. Для отложений верхнекембрийского уровня пластовые температуры варьируются от 44 до 90 °С и 44–70 °С соответственно (рис. 3, б). Геотермические градиенты снижаются от 2,4 °С/100 м на востоке бассейна до 2,2 °С/100 м на западе. Для среднекембрийских отложений также наблюдается тенденция уменьшения пластовых температур от 65–100 °С до 58–75 °С с запада к осевой части бассейна и геотермических градиентов от 2,2 до 1,6 °С/100 м соответственно. Анализ пластовых температур нижнекембрийского уровня показывает уменьшение геотермического градиента к подошве до значений 1,9 °С/100 м в районе скважин Северо-Лымбельской-2 и Вездеходной-4 и до 1,5 °С/100 м в районе скважин Аверинской-150 и Восток-4.

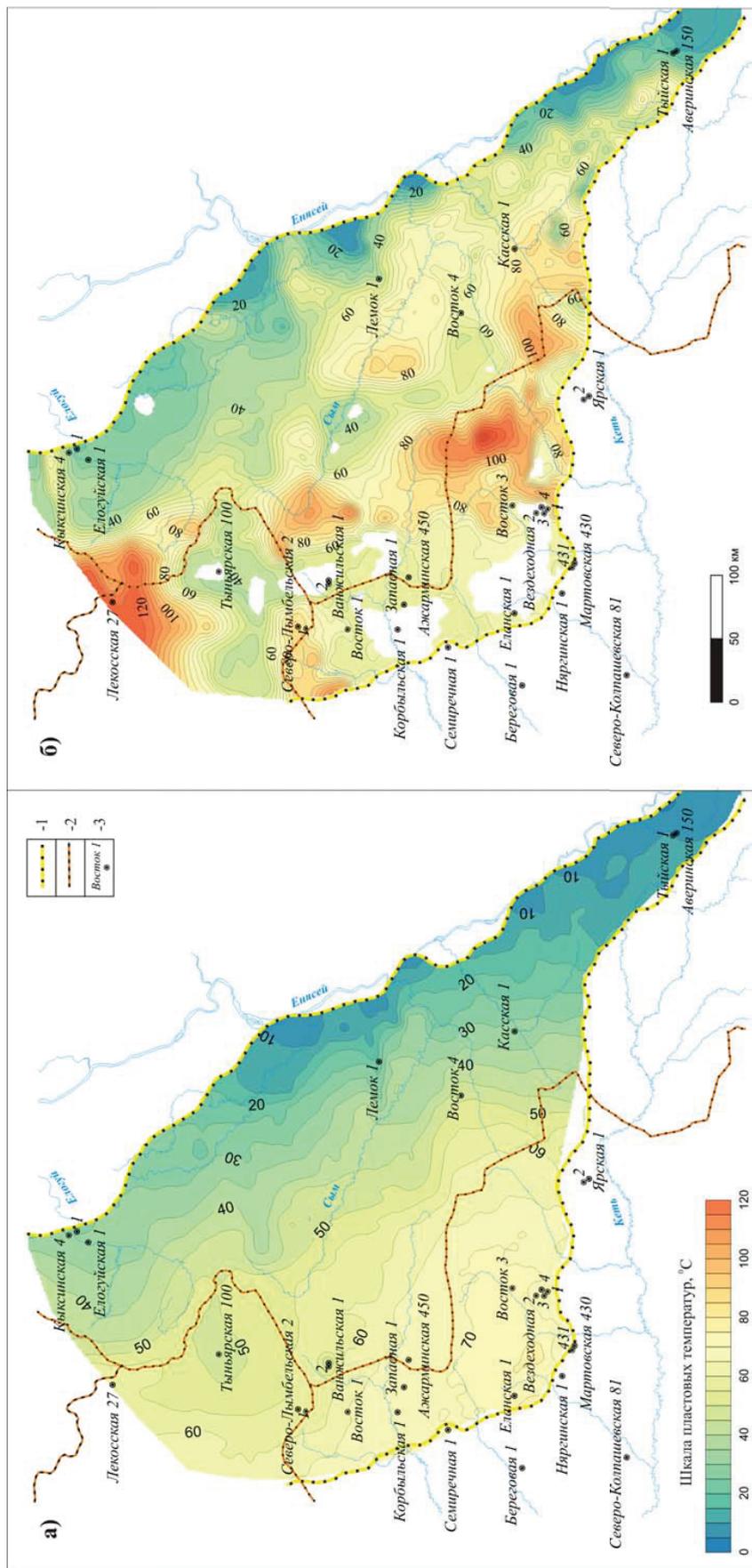


Рис. 3. Карты пластовых температур в кровле баженовской свиты (верхняя юра) (а) и подошве пыжинской свиты (верхний кембрий) (б). Границы: 1 – Предьенисейского осадочного бассейна, 2 – административные; 3 – название площадей и номер скважины
Fig. 3. Maps of formation temperature at the top of the Bazhenov Formation (a) and bottom of the Pyzhino Formation (b). Boundaries of: 1 – Fore-Yenisei sedimentary basin; 2 – administrative; 3 – areas and well numbers

Глубокозалегающие толщи венда и верхнего протерозоя характеризуются еще более низкими градиентами. Для вендских отложений значения пластовых температур в западной части ПОБ варьируют в интервале от 95 до 105 °С, а геотермический градиент составляет 1,7–1,8 °С/100 м. Для восточных районов геотермические данные, характеризующие позднепротерозойские образования, отсутствуют, но на основе наших прогнозов, базирующихся на геотермической модели, можно ожидать величины геотермических градиентов в интервале 1,4–1,8 °С/100 м. Для отложений позднего неопротерозоя–венда в районе скважин Восток-1, Восток-3, Вездеходных 1, 2, 3, 4 и Северо-Лымбельской-2 геотермические градиенты изменяются в пределах 1,2–1,4 °С/100 м, а значения пластовых температур достигают 110–120 °С.

На базе структурных построений, геотермического районирования, полученных регрессионных зависимостей вариаций пластовых температур с глубиной (основная: $T = -(27,497 + H)/41,82$) и другие) с использованием программных пакетов GridBuilder, GridMaster и Surfer были созданы сеточные модели (Grid) распределения пластовых температур по основным стратиграфическим уровням: 1) кровля баженовской свиты (поздняя юра),

2) подошва юрских отложений, 3) подошва пыжинской свиты (верхний кембрий), 4) кровля усольской (оксымской) свиты (нижний кембрий), 5) кровля тэтэрской (райгинской) свиты (граница кембрия и венда) и 6) подошва верхнепротерозойско-палеозойских субплатформенных отложений). Полученные сеточные модели были сведены в единую геотермическую модель Предъенисейского осадочного бассейна (рис. 4).

Заключение

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о весьма сложной структуре геотермического поля Предъенисейского осадочного бассейна, геотермические характеристики которого зависят от нескольких факторов, в первую очередь от особенностей геологического строения, его вещественного состава, геодинамической истории и т. д. Во-вторых, большое влияние оказывает отопляющее воздействие межпластовых перетоков подземных вод из более погруженных горизонтов в тектонически нарушенных зонах.

При анализе геотермического материала выявлена тенденция значительного уменьшения теплового потока и характеристик геотермического поля в направлении от западных районов к восточ-

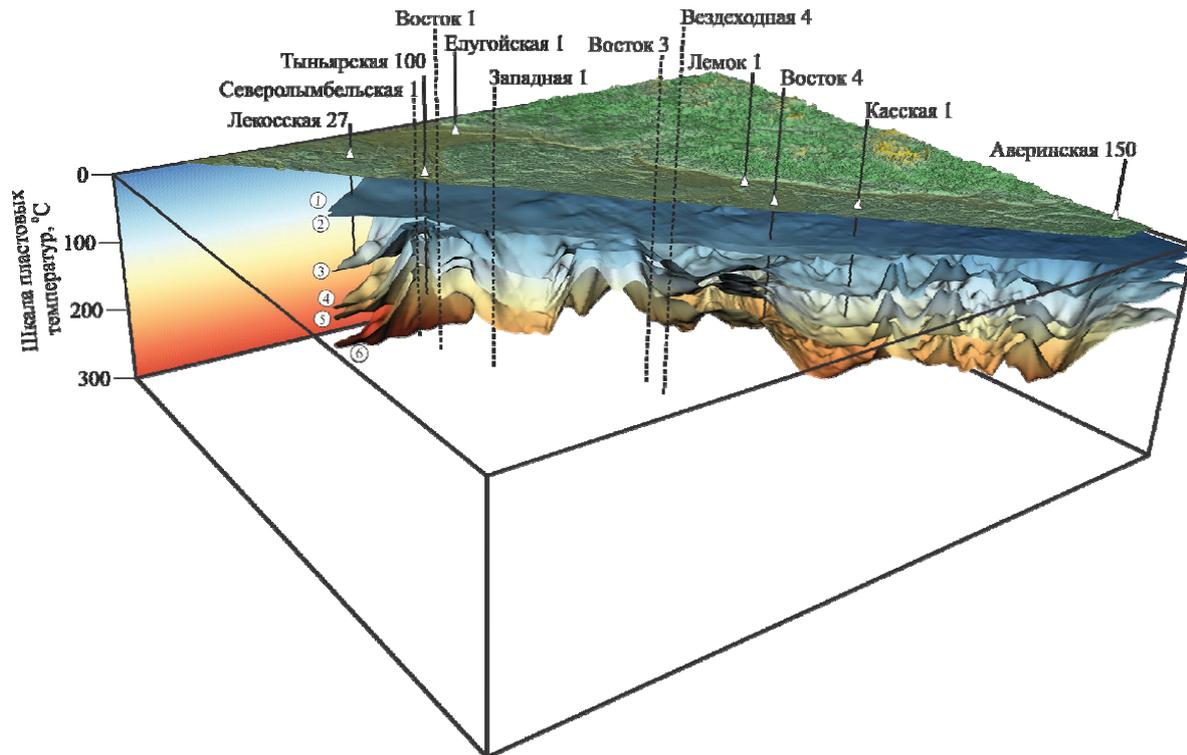


Рис. 4. Геотермическая модель Предъенисейского осадочного бассейна. Основные стратиграфические горизонты: 1 – кровля баженовской свиты (верхняя юра), 2 – подошва юрских мезозойских отложений, 3 – подошва пыжинской свиты (верхний кембрий), 4 – кровля усольской (оксымской) свиты (нижний кембрий), 5 – кровля тэтэрской (райгинской) свиты (граница кембрия и венда), 6 – подошва верхнепротерозойско-палеозойских платформенных отложений

Fig 4. Geothermal model of the Fore-Yenisei sedimentary basin. Main stratigraphic intervals: 1 is the roof of the Upper Jurassic Bazhenov Fm.; 2 is the bottom of Jurassic sediments; 3 is the bottom of Upper Cambrian Pyzhino Fm.; 4 is the top of Lower Cambrian Usolye (Oksym) Fm.; 5 is the top of Cambrian-Vendian Tetera (Raiga) Fm.; 6 is the bottom of the Upper Proterozoic-Paleozoic cratonic sediments

ным. Значения пластовых температур для кровли доюрских отложений составляют 50–85 °С для положительных структур западной части осадочного бассейна, в то время как в осевой части они снижаются до 30–55 °С.

Установленная закономерность согласуется с особенностями геологического строения и геодинамическими реконструкциями бассейна. Согласно реконструкциям, как упоминалось выше, западные районы бассейна в венд-кембрийское время принадлежали к активной окраине материка и располагались в пределах задугового (окраинного) бассейна. На востоке, в тыльной своей части, он переходил в эпиплатформенный бассейн с корой континентального типа. Установленные особенности геотермического поля, по-видимому, являются следствием этой дифференциации и в целом характеризуют переходный тип геологического и геотермического разреза между доюрскими складчатыми сооружениями Западно-Сибирской геосинеклизы и платформенными отложениями Сибирского кратона.

Итогом наших исследований служит трехмерная геотермическая модель (рис. 4), показываю-

щая вертикальную зональность древнего и слабоизученного Предъенисейского осадочного бассейна, перекрытого мощной толщей мезозойско-кайнозойских осадков. Это позволяет рассматривать характер изменения пластовых температур с глубиной и прогнозировать тенденции изменения температуры на труднодоступных объектах, слабо обеспеченных фактическими данными.

Исследования проводились при финансовой поддержке Проекта IX.131.3.2. «Геохимия, генезис и механизмы формирования состава подземных вод арктических районов осадочных бассейнов Сибири» Программы IX.131.3. «Эволюция гидрогеологических систем осадочных бассейнов Сибири» Приоритетного направления IX.131. «Геология месторождений углеводородного сырья, фундаментальные проблемы геологии и геохимии нефти и газа, научные основы формирования сырьевой базы традиционных и нетрадиционных источников углеводородного сырья» Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук Российской Федерации на 2013–2020 годы, Российского Фонда Фундаментальных исследований (проекты № 14–05–00868-а, 16–05–00945-а) и Министерства образования, науки и инновационной политики Новосибирской области в рамках научного проекта № 17–45–540086.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Предъенисейская нефтегазоносная субпровинция – новый перспективный объект поисков нефти и газа в Сибири / А.Э. Конторович, В.А. Конторович, Ю.Ф. Филиппов и др. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2006. – № 5–6. – С. 9–23.
2. Филиппов Ю.Ф. Перспективы нефтегазоносности Предъенисейского осадочного бассейна // Геология нефти и газа. – 2016. – № 6. – С. 35–45.
3. Novikov D.A. Distribution of Cambrian salts in the western Siberian Craton (Yurubcheno-Tokhomo field, Russia) // Arabian Journal of Geosciences. – 2017. – V. 10. – № 1. – P. 1–8.
4. Дульцев Ф.Ф., Новиков Д.А. Геотермический режим недр Предъенисейского осадочного бассейна // ГЕО-Сибирь-2017: Сборник материалов XIII международного научного конгресса. – Новосибирск, 2017. – Т. 2. – № 1. – С. 111–115.
5. Formations, distribution resource potential, and discovery of Sinian-Cabrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China / C. Zou, J. Du, C. Xu, Z. Wang, B. Zhang, G. Wei, T. Wang, G. Yao, S. Deng, J. Liu, H. Zhou, A. Xu, Z. Yang, H. Jiang, Z. Gu // Petroleum exploration and development. – 2014 – V. 41. – № 3. – P. 306–325.
6. Tectonic features of Gaoshiti-Moxi paleo-uplift and its controls on the formation of a giant gas field, Sichuan Basin, SW China / G. Wei, W. Yang, J. Du, C. Xu, C. Zou, W. Xie, S. Wu, F. Zeng // Petroleum exploration and development. – 2015. – V. 42 (3). – P. 283–292.
7. Geothermal energy in sedimentary basins: What we can learn from regional numerical models / M. Cacace, B.O. Kaiser, B. Lewerenz, M. Scheck-Wenderoth // Chemie der Erde – Geochemistry. – 2010. – V. 70. – № 3. – P. 33–36.
8. Gray D.A., Majorowicz J., Unsworth M. Investigation of the geothermal state of sedimentary basins using oil industry thermal data: case study from Northern Alberta exhibiting the need to systematically remove biased data // Journal of geophysics and engineering. – 2012. – № 9. – P. 534–548.
9. Ongoing resource assessment of geothermal energy from sedimentary basins in Texas / R.J. Erdlac Jr., L. Armour, R. Lee, S. Snyder, M. Sorensen, M. Matteucci, J. Horton // Stanford Geothermal Workshop. – Stanford, CA, USA, 2007. – P. 1–8.
10. Palumbo F., Main I.G., Zito G. The thermal evolution of sedimentary basins and its effect on the maturation of hydrocarbons // Thermal evolution of sedimentary basins. – 1999. – № 139. – P. 248–260.
11. Vieira F.P., Hamza V.M., Alexandrino C.H. Obliteration of thermal springs by groundwater flows in sedimentary basins of Brazil // Hydrogeology Journal. – 2014. – V. 22. – P. 69–86.
12. Thermal waters of ‘tectonic origin’: the alkaline, Na-HCO₃ waters of the Rio Valdez geothermal area (Isla Grande de Tierra del Fuego, Argentina) / B. Capaccioni, M. Menichetti, A. Renzulli, A. Tassone, A.D. Huertas // Geofluids. – 2013. – № 13. – P. 21–31.
13. Bozdog A. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of Kavak (Seydis, ehir- Konya) geothermal field, Turkey // Journal of African Earth Sciences. – 2016. – № 121. – P. 72–83.
14. Hydrochemistry and gas geochemistry of the northeastern Algerian geothermal waters / M. Belhai, Y. Fujimitsu, J. Nishijima, M. Bersi // Arabian Journal of Geosciences. – 2017. – V. 10. – № 8. – P. 1–15.
15. Geochemistry and geothermometry of non-volcanic hot springs in West Malaysia / H. Baioumy, M. Nawawi, K. Wagner, M.H. Arifin // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2015. – V. 290. – P. 12–22.
16. Гидродинамика и геотермия нефтяных структур / Г.В. Богомолов, Ю.В. Мухин, Ю.А. Балакирев и др. / под ред. академика АН СССР Г.В. Богомолова. – Минск: Наука и техника, 1975. – 239 с.
17. Кругликов Н.М., Нелюбин В.В., Яковлев О.Н. Гидрогеология Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна и особенности формирования залежей углеводородов. – Л.: Недра, 1985. – 279 с.
18. Курчиков А.Р. Гидрогеотермические критерии нефтегазоносности. – М.: Недра, 1992. – 231 с.
19. Новиков Д.А., Шварцев С.Л. Гидрогеологические условия Предъенисейской нефтегазоносной субпровинции // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 10. – С. 1131–1143.

20. Филиппов Ю.Ф. Предъенисейский осадочный бассейн: сейсмо-геологическая модель и геодинамическая эволюция // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 3–4. – С. 455–471.
21. Филиппов Ю.Ф., Сараев С.В., Коровников И.В. Стратиграфия и корреляция кембрийских отложений Предъенисейского осадочного бассейна Западной Сибири // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5–6. – С. 891–905.
22. Венд Предъенисейского осадочного бассейна (юго-восток Западной Сибири) Д.В. Гражданкин, А.Э. Конторович, В.А. Конторович, С.В. Сараев, Ю.Ф. Филиппов, А.С. Ефимов, Г.А. Карлова, Б.Б. Кочнев, К.Е. Наговицин, А.А. Терлеев, Г.О. Федянин // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 4. – С. 718–734.
23. Сараев С.В., Филиппов Ю.Ф., Батурина Т.П. Палеогеография Предъенисейского осадочного бассейна в венде и кембрии // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: Материалы VII Всероссийского литологического совещания. – Новосибирск, 28–31 октября 2013. – Новосибирск: ИНГТ СО РАН, 2013. – Т. III. – С. 73–76.
24. Ростовцев Н.Н. Геологическое строение и нефтегазоносность Западно-Сибирской низменности. Труды ЗапСибНИГНИ. – М.: Недра, 1965. – Вып. 1. – 302 с.
25. Мегакомплексы и глубинная структура земной коры Западно-Сибирской плиты / под ред. В.С. Суркова. – М.: Недра, 1986. – 149 с.

Поступила 25.08.2017 г.

Информация об авторах

Дульцев Ф.Ф., аспирант, младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Новиков Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

UDC 553.981/982:551.24.054

GEOHERMAL ZONALITY OF FORE-YENISEI SEDIMENTARY BASIN**Fedor F. Dultsev**¹,
DultsevFF@ipgg.sbras.ru**Dmitry A. Novikov**^{1,2},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
3, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.² Novosibirsk State University,
2, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the work is caused by the fact that the strata temperature is one of the major factors controlling the degree of transformation of scattered organic matter of rocks, gas and oil generation, formation and conservation of the deposits of hydrocarbons. It is the temperature on which the physicochemical properties and phase state of gases, oil and water depend under the in-situ conditions. Upper Precambrian-Paleozoic deposits of the Fore-Yenisei sedimentary basin are considered in recent years as one of the possible objects for the increment of the resource basis of hydrocarbons within the boundaries of the West Siberian oil-and-gas bearing province. At present, the region under investigation is insufficiently explored by drilling, so in the work we propose a geothermal model showing the character of changes in the strata temperature with depth and allowing us to predict the trends of temperature changes for difficultly accessible objects weakly provided with the actual data.

The aim of the work is to reveal the geothermal features of Upper Precambrian-Paleozoic sediments of the Pre-Yenisei sedimentary basin, zoning and compilation of the geothermal model of the sedimentary fill of the basin.

Methods of investigation. Geothermal parameters of the geological section were calculated; geothermal zoning of the territory was carried out on the basis of the geothermal gradient value. Using the structural maps over the major stratigraphical horizons and the regression dependences of the geothermal parameters with the depth, the grid models were developed with the help of GridBuilder and GridMaster software packages, as well as GS Surfer.

Results. It was determined that the sections of the Upper Precambrian-Paleozoic sediments of the Pre-Yenisei sedimentary basin are comparable with the western regions of the Siberian Platform, both in rock composition and in geothermal conditions, and are characterized by decreased geothermal gradients (1,25–2,55 °C/100 m). For the first time, the authors have developed the detailed geothermal model of sedimentary fill of the basin allowing us to predict the geothermal conditions of the sedimentary strata.

Key words:

Pre-Yenisei sedimentary basin, geothermal zonality, geothermal gradient, strata temperature, geothermal model.

The work was supported by the project IX.131.3.2. «Geochemistry, origin, and formation of groundwater composition of the Siberian Arctic sedimentary basins» of the program IX.131.3. «Evolution of hydrogeological systems in Siberian sedimentary basins» of the priority area IX.131. «Geology of hydrocarbon fields, fundamental problems of petroleum geology and geochemistry, scientific basics for traditional and non-traditional sources of hydrocarbons» of the Program of fundamental scientific researches of the Russian academy of Sciences for 2013–2020 and Russian Foundation of Basic Researches (projects 14–05–00868-a, 14–05–00945-a) and Ministry of Education, Science and Innovation policy of the Novosibirsk Region in the research project no. 17–45–540086.

REFERENCES

- Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Filippov Yu.F. The Pre-Yenisei oil and gas bearing subprovince as a new region for petroleum exploration in Siberia. *Geology, geophysics and the development of oil and gas fields*, 2006, no. 5–6, pp. 9–23. In Rus.
- Filippov Yu.F. Hydrocarbon potential of the Pre-Yenisei sedimentary basin. *Geology of oil and gas*, 2016, no. 6, pp. 35–45. In Rus.
- Novikov D.A. Distribution of Cambrian salts in the western Siberian Craton (Yurubcheno-Tokhomo field, Russia). *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, vol. 10, Iss. 1, pp. 1–8.
- Dultsev F.F., Novikov D.A. *Geotermicheskiy rezhim nedr predniseyskogo osadochnogo basseyna* [Geothermal regime of the Pre-Yenisey sedimentary basin]. *GEO-Sibir-2017: Sbornik materialov XIII mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa* [GEO-Siberia 2017. Proc. of the XIII International Exhibition and Scientific Congress]. Novosibirsk, 2017. Vol. 2, no. 1, pp. 111–115.
- Zou C., Du J., Xu C., Wang Z., Zhang B., Wei G., Wang T., Yao G., Deng S., Liu J., Zhou H., Xu A., Yang Z., Jiang H., Gu Z. Formations, distribution, resource potential, and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China, *Petroleum exploration and development*, 2014, vol. 41, no. 3, pp. 306–325.
- Wei G., Yang W., Du J., Xu C., Zou C., Xie W., Wu S., Zeng F. Tectonic features of Gaoshiti-Moxi paleo-uplift and its controls on the formation of a giant gas field, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum exploration and development*, 2015, vol. 42, no. 3, pp. 283–292.
- Cacace M., Kaiser B.O., Lewerenz B., Scheck-Wenderoth M. Geothermal energy in sedimentary basins: What we can learn from regional numerical models. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 2010, vol. 70, no. 3, pp. 33–36.
- Gray D.A., Majorowicz J., Unsworth M. Investigation of the geothermal state of sedimentary basins using oil industry thermal data: case study from Northern Alberta exhibiting the need to systematically remove biased data. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2012, no. 9, pp. 534–548.
- Erdlac R.J. Jr., Armour L., Lee R., Snyder S., Sorensen M., Matteucci M., Horton J. Ongoing resource assessment of geothermal energy from sedimentary basins in Texas. *Stanford Geothermal*

- Workshop Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*. Stanford, CA, USA, 2007. pp. 1–8.
10. Palumbo F., Main I.G., Zito G. The thermal evolution of sedimentary basins and its effect on the maturation of hydrocarbons. *Thermal evolution of sedimentary basins*, 1999, no. 139, pp. 248–260.
 11. Vieira F.P., Hamza V.M., Alexandrino C.H. Obliteration of thermal springs by groundwater flows in sedimentary basins of Brazil. *Hydrogeology Journal*, 2014, vol. 22, pp. 69–86.
 12. Capaccioni B., Menichetti M., Renzulli A., Tassone A., Huer-tas A.D. Thermal waters of ‘tectonic origin’: the alkaline, Na-HCO₃ waters of the Rio Valdez geothermal area (Isla Grande de Tierra del Fuego, Argentina). *Geofluids*, 2013, no. 13, pp. 21–31.
 13. Bozdogan A. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of Kavak (Seydis, ehir- Konya) geothermal field, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, no. 121, pp. 72–83.
 14. Belhai M., Fujimitsu Y., Nishijima J., Bersi M. Hydrochemistry and gas geochemistry of the northeastern Algerian geothermal waters. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, vol. 10, no. 8, pp. 1–15.
 15. Baioumy H., Nawawi M., Wagner K., Arifin M.H. Geochemistry and geothermometry of non-volcanic hot springs in West Malaysia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, vol. 290, pp. 12–22.
 16. Bogomolov G.V., Mukhin Yu.V., Balakirev Yu.A. *Gidrodinamika i geotermiya neftyanykh struktur* [Hydrodynamics and geothermics of oil structures]. Ed. by G.V. Bogomolov. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975. 239 p.
 17. Kruglikov N.M., Nelyubin V.V., Yakovlev O.N. *Gidrogeologiya Zapadno-Sibirskogo neftegazonosnogo megabasseyina i osobennosti formirovaniya zalezhey uglevodorodov* [Hydrogeology of the West Siberian petroleum megabasin and features of formation of hydrocarbon reservoirs]. Leningrad, Nedra Publ., 1985. 279 p.
 18. Kurchikov A.R. *Gidrogeotermicheskie kriterii neftegazonosnosti* [Hydrogeothermal criteria for hydrocarbon potential]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 231 p.
 19. Novikov D.A., Shvartsev S.L. Hydrogeological conditions of the Pre-Yenisei petroleum subprovince. *Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 10, pp. 1131–1143. In Rus.
 20. Filippov Yu.F. The Fore-Yenisei sedimentary basin: Seismic-geological model and geodynamic history. *Geology and geophysics*, 2017, vol. 58, no. 3–4, pp. 455–471. In Rus.
 21. Filippov Yu.F., Saraev S.V., Korovnikov I.V. The Cambrian sediments of the Cis-Yenisei basin (West Siberia): stratigraphy and correlation. *Geology and geophysics*, 2014, vol. 55, no. 5–6, pp. 891–905. In Rus.
 22. Grazhdankin D.V., Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Sarayev S.V., Filippov Yu.F., Efimov A.S., Karlova G.A., Kochnev B.B., Nagovitsin K.E., Terleev A.A., Fedyanin G.O. Vendian of the Fore-Yenisei sedimentary basin (southeastern West Siberia). *Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 4, pp. 718–734. In Rus.
 23. Saraev S.V., Filippov Yu.F., Baturina T.P. *Paleogeografiya predeniseyskogo osadochnogo basseyna v Vende i Kembrii* [Paleogeography of the Predenisey sedimentary basin in the Vendian and Cambrian]. *Osadochnye basseyny, sedimentatsionnye i postsedimentatsionnye protsessy v geologicheskoy istorii. Materialy VII Vserossiyskogo litologicheskogo soveshchaniya* [Sedimentary basins, sedimentation and post-sedimentation processes in geological history: Proceedings of the VII All-Russian Lithological Conference]. Novosibirsk, October 28–31, 2013. Novosibirsk, IPGG SB RAS Publ., 2013. Vol. III, pp. 73–76.
 24. Rostovtsev N.N. Geologicheskaya struktura i neftegazonosnost Zapadno-Sibirskoy nizmennosti [Geological structure and hydrocarbon occurrences of the West Siberian lowland]. *Trudy ZapSibNIGNI* [Proceedings of ZapSibNIGNI]. Moscow, Nedra Publ., 1965. Iss. 1, 302 p.
 25. *Megakompleksy i glubinnaya struktura zemnoy kory Zapadno-Sibirskoy plity* [Megacomplexes and deep structure of the Earth’s crust of the West Siberian Plate]. Ed. by V.S. Surkov. Moscow, Nedra Publ., 1986. 149 p.

Received: 25 August 2017.

Information about the authors

Fedor F. Dultsev, post-graduate student, junior research scientist, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS.

Dmitry A. Novikov, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS; associate professor, Novosibirsk State University.