УДК 553.98(571)

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ НЕФТЕМАТЕРИНСКОЙ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ АРКТИЧЕСКИХ РАЙОНОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Исаев Валерий Иванович¹,

isaevvi@tpu.ru

Искоркина Альбина Альбертовна¹,

iskorkina.a@mail.ru

Косыгин Владимир Юрьевич²,

kosyginv@inbox.ru

Лобова Галина Анатольевна¹,

lobovaga@tpu.ru

Осипова Елизавета Николаевна¹,

osipovaen@list.ru

Фомин Александр Николаевич³,

fominan@ipgg.sbras.ru

- ¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
- ² Вычислительный центр ДВО РАН, Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65.
- ³ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3.

Актуальность. Арктические районы Западной Сибири имеют уникальные палеоклиматические особенности, инверсионную тектоническую историю в палеоген-неогене, значительные вариации геохимических характеристик нефтематеринских отложений. Это обусловливает необходимость совершенствовать схемы и параметры количественной оценки ресурсов углеводородов объемно-генетическим методом, основанным на палеореконструкциях геотермического режима материнских отложений.

Цель исследований: оценить влияние факторов палеоклимата – векового хода температур на земной поверхности и неоплейстоценовых толщ мерзлоты, ледниковых покровов, в комплексе с фактором эрозионных процессов, – на расчетный геотермический режим нефтематеринской баженовской свиты.

Объект исследований: баженовские отложения мезозойско-кайнозойского разреза, вскрытые глубокими скважинами на Арктической, Среде-Ямальской и Ростовцевской площадях (п-ов Ямал).

Методика исследований базируется на оригинальном компьютерном палеотемпературном моделировании, учитывающем параметры седиментационной истории и истории теплофизических свойств осадочной толщи, включающей вечномерзлые породы и ледники, и не требующем априорных сведений о величинах и природе глубинного теплового потока.

Результаты исследований по выявлению и учету параметров денудаций, в комплексе с оценкой роли и учетом палеоклиматических характеристик, позволили сделать выводы и дать рекомендации. При определении ресурсов углеводородов объёмногенетическим методом на землях арктического региона рекомендуется применять «арктический» вековой ход температур и учитывать динамику толщи неоплейстоценовой мерзлоты мощностью 300–600 м. В случае неучета вечной мерзлоты и палеоклиматического хода температур расчетные ресурсы УВ могут быть занижены до 40–50 %. Сформулированы задачи предстоящих исследований, среди которых оценка роли палеоклиматических факторов в термической истории нефтематеринской китербютской свиты и разработка формализованных сценариев выявления и количественной оценки перерывов осадконакопления и размывов по данным геотермии.

Ключевые слова:

Палеоклимат, инверсионная тектоника, геотермический режим, нефтематеринские баженовские отложения, п-ов Ямал.

Введение

В рамках новой парадигмы развития сырьевой базы углеводородов РФ главными объектами прогнозирования и поисков становятся арктические районы Западной Сибири и сланцевые ресурсы баженовской свиты. Для реализации новой парадигмы требуется создание новой фундаментальной теоретической базы и технологий поисков [1].

Оценка перспектив нефтегазоносности – оценка плотности ресурсов углеводородов и районирование территорий, зон нефтегазонакопления – выполняется объемно-генетическим методом (бассейновое моделирование). Количество генерированных углеводородов (УВ) рассчитывается на основе реконструкции геотемпературного режима нефтематеринских отложений [2, 3].

Новейшими исследованиями методом палеотемпературного моделирования, на примере нефтематеринских баженовских отложений, вскрытых скважиной Арктическая 11 на п-ове Ямал, установлено [4], что неучет векового хода температур на поверхности Земли и толщи неоплейстоценовой мерзлоты не позволяет адекватно восстановить термическую историю материнских отложений. При определении ресурсов УВ объёмно-генетическим методом на землях арктического региона Западной Сибири рекомендовано применять «арктический» вековой ход температур и учитывать динамику толщи неоплейстоценовой мерзлоты.

В публикации Арктической экспедиции IODP 302 [5] приводятся результаты построения и анализа объединенной литосферно-бассейновой термальной модели (система PetroProb) в пределах Хребта Ломоносова. Для учета палеоклиматического фактора авторами построен «местный» (для района Хребта Ломоносова) вековой ход температур на земной поверхности, начиная со 100 млн лет назад. Для этого использовались результаты палинологического и изотопного анализа углерода органического вещества. Здесь следует отметить, что «местный» вековой ход температур на земной поверхности [5], в интервале геологического времени 100-4 млн лет назад, идеально совпадает с «арктическим» вековым ходом температур на земной поверхности [4], независимо построенным в результате сводки и обобщения экспериментальных определений и палеоклиматических реконструкций для севера Западно-Сибирской низменности.

В заключении S. Nelskamp с соавторами отметили, что эволюционирование температур на земной поверхности оказывает большое влияние на зрелость нефтематеринской породы: в зависимости от временных вариаций поверхностных температур могут быть большие или меньшие объемы получаемых УВ.

Основная цель настоящих исследований – дальнейшая аргументация существенного влияния 2-х факторов палеоклимата – векового хода температур на земной поверхности и неоплейстоценовых толщ мерзлоты – на расчетный геотермический режим нефтематеринских свит, определяющий подсчет плотности ресурсов. Для этого выполнены палеотемпературные исследования баженовских отложений, вскрытых глубокими скважинами на Ростовцевском и Средне-Ямальском месторождениях п-ова Ямал.

Вместе с тем представляет интерес количественная оценка влияния 3-го фактора палеоклимата – позднечетвертичных ледниковых покровов – на расчетный геотермический режим и степень реализации генерационного потенциала материнских отложений Западной Сибири. Определение роли ледниковых покровов приобретает особую актуальность при оценке перспектив нефтегазоносности арктических территорий Западной Сибири [3]. Для этого выполнено построение и приложение векового хода мощностей ледниковых покровов в четвертичное время.

Построение векового хода мощностей мерзлых пород в неоплейстоцене (северная палеоклиматическая зона Западной Сибири)

Вековой ход мощностей ледниковых покровов (северные широты 66–74°) построен на основе обобщения результатов детальных палеогеографических, стратиграфических исследований и палеокриологических реконструкций для севера Западно-Сибирской низменности, начиная с развития процессов оледенения в верхнем плейстоцене.



- Рис. 1. Мощности ледников северной палеоклиматической зоны Западной Сибири в неоплейстоцене: 1–8 значение мощности ледников: 1 по Глобальные изменения... [7], 2 по С.А. Архипову и др. [8], 3 по С.В. Томирдиаро [9], 4 по С.А. Лаухину [10], 5 по Четвертичные оледенения ... [11]; 6 по Е.В. Артюшкову [12]; 7 по В.В. Баулину [6], 8 по Ю.Б. Баду [13]; 9 кусочно-линейная аппроксимация векового хода мощностей ледников
- **Fig. 1.** Capacities of glaciers of a northern paleoclimatic zone of Western Siberia in Pleistocene: 1–8 the value of power of glaciers: 1 on Global changes ... [7], 2 after S.A. Arkhipov et al. [8], 3 after S.V. Tomirdiaro [9], 4 after S.A. Laukhin [10], 5 on the Quarternary freezing ... [11]; 6 after E.V. Artyushkov [12]; 7 after V.V. Baulin [6], 8 after Yu.B. Badu [13]; 9 is the piecewise and linear approximation of the secular variation of glaciers capacity

На рис. 1 изображен вековой ход мощностей ледниковых покровов в четвертичное время для северной палеоклиматической зоны Западной Сиби-

ри, начиная с развития процессов оледенения в самаровское время [6] и заканчивая деградацией ледников в конце сартанского времени [7].



Рис. 2. Обзорная схема территории исследований: 1 – населенный пункт и его название; 2 – поисково-разведочная скважина; 3 – сейсмический профиль работ МОГТ 2D; 4 – контур месторождения и его название (объекты экспериментальных исследований); 5 – гидрография и береговая линия; 6 – моделируемая скважина и ее индекс: Арк-11 – Арктическая 11, С-Я-14 – Средне-Ямальская 14, Рос-64 – Ростовцевская 64

Fig. 2. Review scheme of the studied area: 1 is the locality and its name; 2 is the exploration well; 3 is the seismic profile of works MOGT 2D; 4 is the contour of the field and its name; 5 is the hydrography and coastline; 6 is the well simulated and its index: Apκ-11 – Arkticheskaya 11, C-9-14 – Sredne-Yamalskaya 14, Poc-64 – Rostovtsev-skaya 64

Объект исследований

Моделирование палеогеотемпературных условий нефтематеринских баженовских отложений выполнено для палеоклиматических и геологогеофизических условий арктических районов Западной Сибири в ходе исследований на площадях глубокого бурения месторождений углеводородов п-ова Ямал, расположенных на разных широтах (рис. 2, табл. 1).

Осадочный мезозойско-кайнозойский чехол территории исследования начинает формироваться в ранней юре. К концу волжского века трансгрессия моря расширилась, идет накопление баженовской свиты (J_3+K_1bg) , обогащенной органическим веществом.

Нефтематеринская баженовская свита является основным источником формирования залежей УВ в ловушках верхнеюрского и мелового нефтегазоносных комплексов (НГК), а также приоритетной сланцевой формацией. Однако, в отличие от юго-западных районов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции [14], баженовские отложения в арктической зоне существенно варьируют как по концентрациям рассеянного органического вещества (РОВ), нередко уменьшаясь до 1-2%, так и по типу РОВ, переходя к гумусово-сапропелевому типу.

Начиная с апт-сеномана, морской режим господствует до начала эоцена. Раскрытие котловины Арктического бассейна приводит к смене знака вертикальных тектонических движений и наступает позднеэоценовая регрессия. Анализ мощностей палеоген-неогена [15] показывает, что кровля люлинвора (ирбита) могла быть подвергнута денудации. При этом размытый слой мог составить порядка 500-700 м.

Дискуссия о перерывах в осадконакоплении, эрозиях на рубеже позднего палеогена и эоцена в арктической зоне Западной Сибири продолжается по сей день [16–18]. Наличие перерывов в осадконакоплении и размывов установлено однозначно, однако их объем и временные привязки однозначно не определены.

Анализ предварительно выполненных нами палеотектонических и палеотемпературных реконструкций свидетельствует о том, что накопление шло до середины миоцена на протяжении 31,9 млн лет (нюрольская, тавдинская, атлымская, новомихайловская, туртасская, абросимовская свиты) в объеме 335–535 м и за 4 млн лет, в раннебищеульское время, эти отложения были размыты.

Ингрессиям бореального моря в среднем миоцене — раннем плиоцене, с конца бищеульского времени и до конца новопортовского, обязаны накопления осадков толщиной 113 м, которые в последующий этап положительных тектонических движений, за 1,3 млн лет, денудируются. С началом позднего миоцена идет накопление плиоцен-четвертичных озерно-аллювиальных осадков.

Таблица 1.	Характеристика разрезов скважин Арктического, Средне-Ямальского и Ростовцевского месторождений
Table 1	Characteristic of the sections of Arcticheskava 11 Sredne-Yamalskava 14 and Rostovtsevskava 64 wells

	,	,				
	Значение/Value					
Характеристики/Characteristics		Скважина/Well				
	Арктическая 11 Arcticheskaya 11	Средне-Ямальская 14 Sredne-Yamalskaya 14	Ростовцевская 64 Rostovtsevskaya 64			
Забой, м/Bottom, m	3624	3383	3485			
Отложения на забое (свита) Sediments at the bottom (suite)	Левинская (J ₁ Iv) Levinskaya	Надояхская (J ₁ +J ₂ nd) Nadoyahskaya	Леонтьевская (J ₂ ln) Leontjevskaya			
Кровля баженовской свиты (J ₃ +K ₁ bg), м Roof of the Bazhenov suite (J ₃ +K ₁ bg), m	2792	2855	3162			
Мощность баженовской свиты, м Capacity of the Bazhenov suite, m	16	35	33			
Мощность палеогеновых отложений в современном разрезе, м Capacity of the Paleogene deposits in the current section, m	223	350	400			
Мощность неоген-четвертичных отложений в современном разрезе, м Capacity of the Neogene-Quarternary deposits in the current section, m	280	200	266			
Размыв палеоген-неогеновых отложений (14,5–18,5 млн лет назад), м Scour of the Paleogene-Neogene deposits (14,5–18,5 million years ago), m	535	435	335			
Размыв неогеновых отложений (4,1–5,4 млн лет назад), м Scour of the Neogene deposits (4,1–5,4 million years ago), m	113	113	113			
Мощность вечномерзлых пород в плиоцен-квартере (0,52–0,18 млн лет назад), м Capacity of the permafrost rocks in the Pliocene-Quarternary (0,52–0,18 million years ago), m	600	600	600			
Мощность вечномерзлых пород в плиоцен-квартере (0,18–0,0 млн лет назад), м Capacity of permafrost rocks in the Pliocene-Quarternary (0,18–0,0 million years ago), m	300	300	300			
Мощность ледникового покрова в неоплейстоцене (0,18—0,13 млн лет назад), м Capacity of glacial cover in the Neo-Pleistocene (0,18—0,13 million years ago), m	500	500	500			
Мощность ледникового покрова в неоплейстоцене (0,13-0,05 млн лет назад), м Capacity of glacial cover in the Neo-Pleistocene (0,13-0,05 million years ago), m	1500	1500	1500			
Мощность ледникового покрова в неоплейстоцене (0,05–0,015 млн лет назад), м Capacity of glacial cover in the Neo-Pleistocene (0,05–0,015 million years ago), m	500	500	500			
Результаты испытаний верхнеюрских-нижнемеловых пластов (свита; пласт; тип флюида; дебит, м³/сут) Results of the test of the Upper Jurassic—Lower Cretaceous layers (suite; layer; fluid type; output, m³/d)	Не испытывал	ись Not tested	Ахская; БЯ ₉₋₁₀ ; газ, 210 тыс.; конденсат, 35,2; вода, 1,5 Akhskaya; BYa ₉₋₁₀ ; gas, 210 thousand; condensate, 35,2; water, 1,5 Axcкая; БЯ ₉₋₁₀ ; вода, 3,9 Axckaя; HП ₂₋₃ ; газ, 6,4 тыс. Akhskaya; BYa ₉₋₁₀ ; water, 3,9 Axckaя; HП ₂₋₃ ; газ, 6,4 тыс. Akhskaya; NP ₂₋₃ ; gas, 6,4 thousand Axckaя; HП ₅₋₆ ; газ, 11,5 тыс.; нефть, 6,5 Akhskaya; NP ₅₋₆ ; gas, 11,5 thousand; oil, 6,5 Axckaя; HП ₅₋₇ ; neфть, 4,2 Akhskaya; NP ₅₋₇ ; oil, 4,2 Akhskaya; At-1; сухо Akhskaya; Ach-1; dry Баженовская; сухо Bazhenov; dry			
Измеренные пластовые температуры (свита; глубина замера, м; температура, °C) Measured reservoir temperatures (suite; measurement depth; temperature, °C)	Левинская/Levinskaya; 3533; 125 Левинская/Levinskaya; 3560; 126	Марресалинская Marresalinskaya; 846; 17	Ахская/Akhskaya; 2470; 75 Ахская/Akhskaya; 2650; 81 Ахская/Akhskaya; 2660; 81			
«Измеренные» температуры по ОСВ (глубина отбора, м; (R_{vt}°); температура, °C) Measured temperatures by reflective ability of a vitrinit (selection depth; (R_{vt}°); temperature, °C)	2000; (0,65); 100 2500; (0,80); 120	1700; (0,52); 83 2200; (0,65); 100 3000; (0,80); 120	2096 м; (0,53); 84 2600; (0,63); 98 2827; (0,73); 111			

В случае учета эрозионных процессов при моделировании по критерию «невязки» измеренных (наблюденных) и расчетных геотемператур результаты являются оптимальными: «невязки» составляют порядка ± 2 °C, размывы палеоген-неогено-

вых отложений (335–535 м) и неогеновых отложений (113 м) подтверждаются. А результаты моделирования без учета эрозионных процессов однозначно неприемлемы, «невязки» составляют \pm (5–12–16)°C.

О методике исследований

Для исследований применен метод палеотемпературного моделирования, основанный на численном решении уравнения теплопроводности горизонтально-слоистого твердого тела с подвижной верхней границей, реализованный в программном обеспечении TeploDialog [14, 19, 20].

Расчет палеотемператур состоит из двух этапов. На первом, по распределению температур T, «наблюденных» в точках разреза скважины, рассчитывается тепловой поток q через поверхность основания осадочного чехла, т. е. решается обратная задача геотермии – классическая обратная задача геофизики. На втором этапе, с известным значением q решаются прямые задачи геотермии – непосредственно рассчитываются температуры U в заданных точках осадочной толщи Z (в том числе в материнской свите) на *любые* заданные моменты геологического времени t.

Для решения обратной задачи геотермии используем в качестве «наблюденных» как измерения пластовых температур, полученные при испытаниях скважин, так и палеотемпературы, определенные по отражательной способности витринита (OCB) (табл. 1).

Первое краевое условие модели определяется температурой поверхности осадконакопления, т. е. фактором палеоклимата, и задается в виде кусочно-линейной функции «арктического» векового хода температур на поверхности Земли [4].

Параметризация осадочного разреза, вскрытого скважиной, определяющая параметры седиментационной и теплофизической модели, принимается в соответствии с литолого-стратиграфической разбивкой скважины (табл. 2).

Наличие перерывов в осадконакоплении и величины денудации подтверждены и оценены путем многовариантных расчетов при различных сценариях тектоно-седиментационной истории и последующего выбора сценария, отвечающего критерию «невязки».

Формирование, существование, деградация толщи вечномерзлых пород [4] и ледникового покрова (рис. 1) учитываются как своеобразные динамичные литолого-стратиграфические комплексы, обладающие аномально высокими значениями теплопроводности λ и температуропроводности а. А накапливающийся материал ледника представлен аномально низкой плотностью σ .

Формализованный учет толщи мерзлоты осуществляется начиная с 0,52 млн лет назад «мгновенной» (по меркам геологического времени, за 0,3+3,0 тыс. лет) заменой «нормальных» осадочных отложений 600-метровой толщей мерзлых пород со своими теплофизическими характеристиками. Затем эта толща мерзлых пород перекрывает осадочный чехол в течение 334 тыс. лет. Далее «мгновенно» (0,3+0,15+0,15 тыс. лет) толща мерзлых пород деградирует в объеме 300 м. И далее вечномерзлые породы существуют в объеме 300 м до настоящего времени, в последние 182 тыс. лет.

Учет толщи ледникового покрова осуществляется начиная с 0,182 млн лет назад. За 5 тыс. лет сформировался 500-метровой ледник со своими теплофизическими характеристиками и просуществовал в таком объеме 47 тыс. лет. Затем, за 10 тыс. лет, мощность ледника выросла до 1500 м, и в таком объеме он существует 70 тыс. лет. Далее, за 10 тыс. лет, ледник сокращается до 500 м и существует в течение 20 тыс. лет. К моменту 15 тыс. лет назад (конец сартанского времени) ледник полностью деградирует.

Решение *прямых задач геотермии* выполнялось на 52 ключевых момента геологического времени, соответствующих временам начала/завершения формирования каждой свиты, перекрывающей материнскую баженовскую, а также точкам «излома» векового хода температур на земной поверхности и «переломным» моментам формирования и деградации неоплейстоценовой мерзлоты, ледникового покрова.

Модель процессов нефтегазообразования [21] позволяет по геотемпературному критерию выполнить выделение очагов интенсивного образования нефтей из РОВ материнских отложений: пороговая геотемпература вхождения в главную зону нефтеобразования (ГЗН) U≥95 °C для РОВ гумусово-сапропелевого типа.

Количественное определение влияния палеоклимата на расчетный геотермический режим и на оценку степени реализации генерационного потенциала материнских отложений выполняется на основе анализа вариабельности результатов пяти вариантов палеотемпературных реконструкций. Вариант 1 – без учета факторов палеоклимата. Вариант 2 – учет «стандартного» векового хода температур, без учета неоплейстоценовой мерзлоты и ледников. Вариант 3 - учет «арктического» векового хода температур, без учета неоплейстоценовой мерзлоты и ледников. Вариант 4 - учет «арктического» векового хода температур, учет динамики неоплейстоценовой мерзлоты, без учета ледников. *Вариант 5* – учет «арктического» векового хода температур, учет динамики неоплейстоценовой мерзлоты и ледников.

Основным критерием адекватности и предпочтительности результатов палеотемпературного моделирования выступает оптимальная согласованность («невязка») максимума расчетных геотемператур с «наблюденными» температурами «максимального палеотермометра» – с температурами, определенными по ОСВ. В той же степени важна оптимальная «невязка» расчетных геотемператур и с «наблюденными» пластовыми температурами. Оптимальная «невязка», принятая в классической разведочной геофизике, – это средняя квадратичная разность расчетных и наблюденных значений, равная погрешности наблюдений [22]. Эта погрешность порядка ±2 °С.

Таблица 2. Пример параметрического описания седиментационной истории и теплофизических свойств осадочной толщи, вскрытой скважиной Ростовцевская 64

Table 2.	Parametrical description of history sedimentation and thermal properties of sedimentary thickness opened with the Rostov-
	skaya well 64

Свита, толща (стратиграфия) Suite, strata (stratigraphy)	Мощность, м Thickness, m	Возраст, млн лет назад Age, million years ago	Время накопления, млн лет Accumulation time, million years	Плотность, г/см³ Density, g/cm³	Теплопроводность, Вт/м-град Thermal conductivity, W/m-deg	Teмпературопро- водность, м²/с Thermal diffusivity, m²/s	Tепловыделение, BT/M ³ Heat generation W/m ³
	-	0,00-0,015	0,015	-	-	-	-
	-500	0,015-0,02	0,005	-	-	-	-
	-	0,02-0,04	0,02	-	-	-	-
	-1000	0,04-0,05	0,01	-	-	-	-
	-	0,050-0,120	0,070	-	-	-	-
	+1000	0,120-0,130	0,010	0,92	2,25	1,2e-006	1,22e-007
Неоплейстоцен/Neo-Pleistocene Q^{-N_2}	-	0,130-0,177	0,047	-	-	-	-
. ,	+500	0,177-0,182	0,005	0,92	2,25	1,2e-006	1,22e-007
	300	0,1820-0,18215	0,00015	2,10	2,09	1,05e-006	1,22e-006
	300	0,18215-0,1823	0,00015	2,10	1,3	/e-00/	1,22e-006
	-600	0,1823-0,1826	0,0003		_		
	600	0,1826-0,5167	0,3341	2 10	2.00	1.050.006	1 220 006
	-600	0,5107 0,5197	0,003	2,10	2,09	1,050-000	-
Kpanton+UUMOUGH O-N. (Ouarter+Pliocone	266	0,5137 0,520	2 5 0	2.04	1 20	6 50 007	1.10,006
		0,320 4,1	1.2	2,04	1,29	0,58-007	1,12-000
	E0	4,1 3,4 E 1-9 1	2,1	2.09	1 2 2	70.007	1.20.006
	20	5,4 ⁻ 8,4	3	2,08	1,33	7e-007	1,20-000
	25	8,4-12,5	4,1	2,08	1,33	76-007	1,20-006
Бищеульская <i>bscn N</i> ₁ / Bisncheuiskaya	38	12,5-14,5	2	2,08	1,33	/e-00/	1,2e-006
	-335	14,5-18,5	4	-	-	-	-
Аоросимовская /v ₁ /Abrosimovskaya	20	18,5-23,0	4,5	2,08	1,33	/e-00/	1,2e-006
Туртасская <i>tur</i> μ_3 / Turtasskaya	50	23,0-28,0	5	2,08	1,33	/e-00/	1,2e-006
Новомихаиловская $nvm \mathcal{H}_3$ /Novomikhaylovskaya	35	28,0-30,0	2	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Атлымская <i>atl</i> # ₃ /Atlymskaya	65	30,0-34,0	4	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Тавдинская $tv H_2/1$ avdinskaya	110	34,0-42,6	8,6	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Нюрольская nl P_2 /Nyurolskaya	55	42,6-50,4	7,8	2,08	1,33	7e-007	1,2e-006
Ирбитская 🖓 ir/Irbitskaya	180	50,4-55,0	4,6	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Серовская <i>₽₁sr</i> /Serovskaya	100	55,0-58,0	3	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Тибейсалинская <i>₽</i> ₁ tb/Tibeysalinskaya	40	58,0-63,7	5,7	2,09	1,35	7e-007	1,2e-006
Ганькинская <i>K</i> ₂ + - <i>P</i> ₁ gn/Gankinskaya	80	63,7-73,0	9,3	2,11	1,37	7e-007	1,25e-006
Березовская K ₂ b/Berezovskaya	338	73,0-89,0	16	2,15	1,41	7,5e-007	1,25e-006
Кузнецовская <i>K₂kz</i> /Kuznetsovskaya	18	89,0-92,0	3	2,18	1,43	8e-007	1,25e-006
Марресалинская $K_2 - K_1 mr / Marresalinskaya$	466	92,0-102,0	10	2,26	1,49	8e-007	1,25e-006
Яронгская <i>Kıjar</i> /Yarongskaya	206	102-108,5	6,5	2,39	1,6	8e-007	1,25e-006
Танопчинская K₁tn/Tanopchinskaya	718	108,5-133,2	24,7	2,44	1,62	8e-007	1,25e-006
Ахская <i>K₁ah</i> /Akhskaya	750	133,2-142,7	9,5	2,44	1,64	8e-007	1,25e-006
Баженовская <i>J₃+K₁bg</i> /Bazhenovskaya	33	142,7-149,3	6,6	2,42	1,62	8e-007	1,3e-006
Нурминская J ₂ nr/Nurminskaya	72	149,3-161,7	12,4	2,42	1,62	8e-007	1,3e-006
Малышевская J ₂ ml/Malyshevskaya	105	161,7-171,0	9,3	2,45	1,63	8e-007	1,3e-006
Леонтьевская J ₂ In/Leontyevskaya	113	171,0-173,0	2	2,47	1,65	8e-007	1,3e-006
Мощность разреза, м/Section capacity, m	3485						

Примечание. Коричневой заливкой показаны времена накопления нефтематеринской баженовской свиты и ее параметрическое описание; серой — размывы палеоген-неогеновых отложений; синей — времена формирования, существования и деградации толщи мерзлоты; светло-синей — времена формирования, существования и деградации толщи ледников.

Note. Accumulation time of Bazhenov petromaternal suites and its parametric description are filled with brown. Erosion of the Paleogene-Neogene deposits is filled with grey. Times of «instant» formation and «instant» degradation of the Neo-Pleistocene permafrost thickness are filled with blue. Time of existence and degradation of glaciers thickness is filled with dark blue. В качестве второго основного критерия адекватности и предпочтительности результатов принята степень согласованности очагов интенсивной генерации УВ, выделяемых по геотемпературному критерию в материнских свитах, с установленной геологоразведкой нефтегазоносностью недр.

Важным критерием достоверности результатов палеотемпературного моделирования является согласованность расчетных значений плотности теплового потока q с данными экспериментального определения плотности теплового потока на территории исследований.

Для сопоставительной оценки вариантов моделирования для материнской свиты выполняется экспресс-расчет интегрального показателя плотности ресурсов генерированных нефтей (R, усл. ед.) по формуле [23]:

$$R = \sum_{i=1}^{n} (U_i t_i \cdot 10^{-2}),$$

где U_i – расчетная геотемпература очага генерации нефти, °C; t_i – интервальное время действия очага – нахождения материнских отложений в ГЗН, млн лет; количество временных интервалов *n* определено числом интервалов геологического времени нахождения материнских отложений в ГЗН. Как следует из принятой формулы, расчетное значение плотности генерированных ресурсов (на участке скважины) напрямую зависит от времени нахождения материнской свиты в ГЗН и от геотемператур ГЗН.

Эффективность метода исследований заключается в следующем:

- 1. В отличие от известных систем бассейнового моделирования (ГАЛА – российская, Temis, PetroProb, PetroMod – зарубежные, реализующие палеотемпературное моделирование), используемая модель в программном обеспечении палеотемпературного моделирования TeploDialog не требует априорных сведений о природе и величине глубинного теплового потока q из основания осадочного разреза. Глубинный тепловой поток определяется решением обратной задачи геотермии - классической обратной задачи разведочной геофизики. Решение обратной задачи выполняется в рамках параметрического описания седиментационной истории и истории теплофизических свойств только осадочной толщи, без привлечения сведений о геодинамике ниже основания осадочного разреза. В то время как известна сложность и неоднозначность определения теплового потока из основания осадочной толщи, базирующегося в системах ГАЛА, Temis, PetroProb и PetroMod на моделях рифтинга литосферы («defined rift phases») [3, 5, 24, 25].
- 2. Для геодинамических условий Западной Сибири, характеризующихся начиная с юрского времени, квазистационарностью глубинного

теплового q [26, 27], решение обратной задачи геотермии – определения q – в системе TeploDialog выполняется однозначно.

3. В математическую модель, реализованную в TeploDialog, *непосредственно*, в строгой математической форме, включены палеотемпературы из определений отражательной способности витринита, как «наблюденные». Геотемператур ры из ОСВ используются аналогичным образом, как и измерения пластовых температур, полученные при испытаниях скважин. Для геотемператур по ОСВ учитывается время срабатывания «максимального палеотермометра». Никаких отдельных «калибровок» по температурам ОСВ выполнять не требуется.

Анализ влияния факторов палеоклимата на расчетный геотермический режим и оценку степени реализации генерационного потенциала баженовских отложений

В работе [4] выполнен анализ результатов палеотектонических и палеотемпературных реконструкций осадочного разреза, включающего баженовскую свиту, для скважины Арктическая 11. Отметим, что в указанной работе анализ выполнен без учета влияния ледниковых покровов. В настоящей статье выполнен детальный анализ влияния более полного комплекса палеоклиматических факторов (мезозойско-кайнозойский вековой ход температур на поверхности Земли, вековой ход мощностей неоплестоценовой мерзлоты и вековой ход мощностей позднечетвертичных ледниковых покровов), на примере скважины Ростовцевская 64, с последующим сводным анализом по всем трем скважинам (рис. 2).

Анализ расчетных значений плотности теплового потока q из основания осадочного разреза (табл. 3) показывает следующее. В вариантах 1, 3, 4 и 5 тепловой поток увеличивается на 2,4-2,6-3,6-2,4 мВт/м² по отношению к расчетному значению теплового потока варианта 2 – 46,7 мВт/м².

Анализ термической истории баженовской свиты (табл. 3) в разрезе скважины Ростовцевская 64 свидетельствует о том, что в варианте 1 (без учета всех факторов палеоклимата) материнская свита «пережила» самую короткую и самую «холодную» главную фазу нефтеобразования (ГФН).

В *вариантах 2, 3, 4 и 5* (с учетом факторов палеоклимата) баженовская свита имеет «богатые» термические истории ГФН. Главные фазы нефтеобразования этих вариантов имеют разные значения абсолютных максимумов палеотемператур.

В варианте 4 присутствие толщи вечномерзлых пород, обладающих высокими значениями теплопроводности λ и температуропроводности a, приводит к увеличению расчетных значений плотности теплового потока q, что, в свою очередь, увеличивает расчетные геотемпературы материнских отложений.

зад адо	, Ś		ost	, в, м	Z Z Z Z	Геотемпературы баженовской свиты, °С								
Ha:	ntui °C	C lar 0,0	лаfі	ико iers	e, n				000	Вариант/Variant				
уеа	Cel Xod	section .	, mej vern	glac	dep					Bup	5			
Ion	inda oŭ ard>	atic atic	of por	оf o						Геотем-	Глубина положения баженовской сви-			
, ⊾ mil	Tar KOB andi	Apk KoB Arct Vari	ro Lity	ocT	HUH6 HOB	1	2	3	4	пературы	ты, м (с учетом ледникового покрова)			
ne,	«C Be «Sta	≜ Be _	рас	ipac	луб жен Bast Baz					Geotem-	Basement depth of Bazhenov suite, m			
월년	Ý		∠ g	βΩ	l Qai					peratures	(taking into account a glacial cover)			
0	0	-4	300	-	3179	106	101	98	96	98	3179			
0,015	-2	-10	300	-	3178	106	100	98	96	97	3179			
0,02	-3	-8	300	500	3177	106	100	98	96	96	3679			
0,03	-4	-5	300	500	3177	106	100	98	96	95	3679			
0,04	-2	-6	300	500	3177	106	100	98	96	95	3679			
0,05	-1	-7	300	1500	3176	106	101	98	95	94	4679			
0,07	-4	-4	300	1500	3174	106	101	97	95	93	4679			
0,11	-4	-5	300	1500	3172	106	101	97	94	92	4679			
0,12	-2	-6	300	1500	3171	106	101	97	93	91	4679			
0,13	-1	-7	300	500	3171	106	101	97	93	91	3679			
0,15	-4	-6	300	500	3169	106	101	96	93	91	3679			
0,177	-6	-7	300	500	3167	106	101	96	93	91	3679			
0,182	-6	-7	300	-	3167	106	101	96	93	91	3179			
0,1826	-7	-7	600	-	3167	105	101	96	93	91	3167			
0,20	-7	-8	600	-	3166	105	102	96	93	91	3166			
0,24	-10	-9	600	-	3163	105	102	96	93	91	3163			
0,5167	-6	-10	600	-	3145	104	102	94	98	95	3145			
0,5197	-5	-11	-	-	3145	104	102	94	98	95	3145			
0,52	-5	-11	-	-	3145	104	102	94	98	95	3145			
1,8	-3	-13	-	-	3062	101	99	93	95	93	3062			
3,2	-2	+5	-	-	2971	98	97	103	105	103	2971			
4,1	+3	+4	-	-	2913	97	96	102	103	101	2913			
4,9	+5	+4	-	-	2983	99	97	104	106	103	2983			
5,4	+5	+4	-	-	3026	100	100	105	107	105	3026			
8,4	+9	+5	-	-	2976	98	100	104	106	104	2976			
10	+9	+6	-	-	2966	98	101	105	106	104	2966			
12,5	+10	+6	-	-	2951	97	101	104	106	104	2951			
14,5	+10	+6	_	_	2913	9/	102	104	106	104	2913			
18,5	+11	+/		-	3248	109	100	117	119	110	3248			
23	+4	+8	_	-	3228	108	108	11.4	117	110	3228			
28	+8	+8		_	31/8	106	109	114	11/	115	31/8			
30	+10	+9		_	3143	105	108	114	110	114	3143			
34	+11	+9	_	_	30/8	102	109	112	114	111	3078			
42.6	±14	±12	_	_	2002	102	111	112	112	111	3003			
42,0	±20 ±21	±12	_	_	2900	90	114	111	112	111	2900			
50.4	+21	+15	_	_	2910	90	112	111	113	111	2310			
50,4	+21	+15	_	_	2313	22	105	10.4	106	10/	2313			
58	+20	+16	_	-	2633	85	101	104	102	104	2755			
63.7	+10	+16	_	_	25055	85	101	101	102	101	2000			
70	+19	+16	_	_	2539	83	98	99	101	99	2555			
73	+19	+15	_	-	2513	87	97	97	99	97	2555			
85	+19	+13	_	_	2260	72	89	86	87	86	2260			
89	+20	+13	_	-	2175	69	86	83	85	83	2175			
97	+20	+13	_	-	2157	69	86	83	84	87	2157			
100	+22	+15	-	-	1784	55	74	71	72	71	1784			
102	+22	+15	_	-	1691	52	71	68	70	68	1691			
108.5	+22	+15	-	-	1485	46	65	62	62	61	1485			
120	+22	+16	-	-	1151	35	55	51	52	51	1151			
134	+21	+15	_	-	704	21	42	36	37	37	704			
135	+22	+15	-	-	625	19	40	34	35	34	625			
142.5	+22	+15	-	-	33	1	23	16	16	16	33			
P.	асчетный те	пловой поте	L ОК ИЗ ОСНОВА	цания. м	<u></u> Вт/м²	40.5	40-	40.7	50.0					
	Calculated he	eat flow fror	n the basem	ent, m\	√m²	49,1	46,/	49,3	50,3		49,1			

Таблица 3. Расчетные геотемпературы баженовской свиты в разрезе скважины Ростовцевская 64Table 3.Calculated geotemperatures of the Bazhenov suite in the section of Rostovskaya 64 well

Отметим, что учет ледникового покрова (*вариант* 5) мало повлиял и на величину расчетного значения плотности теплового потока из основания q, и на интенсивность и продолжительность ГФН.

Сопоставление расчетных и «наблюденных» геотемператур для 3-х скважин приведено в табл. 4. Так как «наблюденные» (измеренные) температуры (включая определенные по ОСВ) имеют погрешность порядка ± 2 °С, то варианты 1 и 2 решений нельзя признать приемлемыми. В этих вариантах «невязки» превышают оптимальную в 2 раза и много больше, а в варианте 1 разница с ОСВ достигает 11–12 °С.

В случае учета палеоклимата (варианты 3, 4 и 5) как «невязки» для пластовых температур, так и сходимость с «максимальным палеотермометром» оптимальны и примерно равноценны. Несколько иные результаты получены для скважины Средне-Ямальская 14. Здесь оптимальным (приемлемым) можно признать, пожалуй, только вариант 4.

Расчет интегрального показателя R (табл. 5) – экспресс-расчет плотности ресурсов генерированных ресурсов баженовских нефтей – дает максимальное или несколько большее значение для варианта 4, приемлемого по критерию «невязки». В этом варианте, помимо учета «арктического» векового хода температур на дневной поверхности, учтена динамика неоплейстоценовой мерзлоты.

Максимальные значения для скважин Средне-Ямальская 14 и Ростовцевская 64 (*вариант 4*: 73, 76 усл. ед.) примерно те же, что и в *варианте 3* (72, 77 усл. ед.), в котором учтен только один фактор палеоклимата – вековой ход температур, но на 40–50 % больше, чем в *варианте 1* (53, 51 усл. ед.), в котором не учтен ни один фактор палеоклимата.

Примечание. Вариант 1 — без учета факторов палеоклимата. Вариант 2 — учет «стандартного» векового хода температур [28, 29], без учета неоплейстоценовой мерзлоты и ледников. Вариант 3 — учет «арктического» векового хода температур [4], без учета неоплейстоценовой мерзлоты и ледников. Вариант 4 — учет «арктического» векового хода температур и динамики неоплейстоценовой мерзлоты. Вариант 5 — учет «арктического» векового хода температур, динамики неоплейстоценновой мерзлоты и льда. Коричневой заливкой показаны температуры главной фазы нефтеобразования (ГФН), темно-коричневой заливкой — палеотемпературный максимум ГФН. Серой заливкой обозначены времена размыва палеоген-неогеновых отложений.

Note. Variant 1 – excluding paleoclimate factors. Variant 2 – considering «standard» secular variation of temperatures [28, 29], without Neo-Pleistocene permafrost and glaciers. Variant 3 – considering «arctic» secular variation of temperatures [4], without Neo-Pleistocene permafrost and glaciers. Variant 4 – considering «arctic» secular variation of temperatures and dynamics of Neo-Pleistocene permafrost. Variant 5 – considering «arctic» secular variation of temperatures and dynamics of Neo-Pleistocene permafrost and the ice. Brown shaded areas indicate temperatures of the major oil generation zone (GFN), dark-brown colour shading indicates paleotemperature maxima GFN, grey shading shows the erosion times of Paleogene-Neogene sediments.

Таблица 4. Сопоставление измеренных и расчетных геотемператур в скважинах Арктического, Средне-Ямальского и Ростовцевского месторождений

Table 4.	Comparison of the measured and calculated geotem-
	peratures in the wells of Arctic, Sredne-Yamal and
	Rostovtsev fields

	es, °C		Вариант/Variant										
E	ры, °С erature	od ^a		1		2		3		4		5	
Глубина, м/Depth, Измеренные температу Measured («observed») temp		Способ измерени Measurement meth	Значение/Value	Разница/Discrepancy									
	Ск	важина А	Аркті	1ческ	сая 11	l/Arc	tiche	eskay	'a 11 v	well			
2000	100	по ОСВ	91	-9	97	-3	99	-1	102	+2	100	0	
2500	120	by OSV	109	-11	115	-5	117	-3	121	+1	119	-1	
3533	125	пласто-	133	+8	128	+3	126	+1	124	-1	126	+1	
3560	126	in-place	133	+7	129	+3	127	+1	125	-1	126	0	
Среднеквадрати- ческое отклонение («невязка»), °С Mean squared error («true error»), °С			±9		±4		±2		±1		±1		
Ске	важин	а Средне	-Яма	альск	ая 14	1/Sre	dne-	Yam	nalska	aya 1	4 we		
1700 2200 3000	83 100 120	по ОСВ by OSV	78 95 122	-5 -5 +2	80 96 121	-3 -4 +1	80 96 122	-3 -4 +2	81 97 122	-2 -3 +2	80 96 121	-3 -4 +1	
846	17	пласто- вые in-place	36	+19	32	+15	28	+11	23	+6	29	+12	
Среднеквадрати- ческое отклонение («невязка»), °С Mean squared error («true error»), °С			±	10	±	:8	±	:6	±	:4	±	:6	
2470		кина рост	ОВЦЕ	BCKG		/ KOS			aya	04 W			
24/0	/5	пласто-	84 00	+9	δU of	+5	//	+2	/5		//	+2	
2050	01 01	вые	90	+9	02 06	+4	02 02	+1	01 01		02 02	+1 +2	
2000	01 0л	in-place	90	+9 _0	00 01	+) -)	δ3 ο Λ		ÖI OE		03 02	+Z _1	
2090	04 00	по ОСВ	0/ 02	_6_	0C	-3 -2	04 00		00 101	1 + 1	00	-1 1	
2000	90 111	by OSV	92 00	0 -12	סצ 102	_2 2	39 106	-5	101	-7	39 106	-5	
2021			22	ιZ	103	0	100	5	100	5	100	J	
Cpe	цнеква	адрати-											
ческо («н Mear («tr	±9		±5		±2		±2		±2				

Примечание. Коричневой заливкой показаны варианты оптимальные (приемлемые) по критерию «невязки».

Note. The optimal variants (accepted) by «residual» criterion are shown in brown filling.

Достоверность результатов палеотемпературного моделирования, выполненного на Арктической, Средне-Ямальской и Ростовцевской площадях, подтверждается хорошей согласованностью полученных расчетных значений плотности теплового потока (50–51–58 мВт/м²) с экспериментальными определениями плотности теплового потока для п-ва Ямал: 50–55 мВт/м² [27], 49–56 мВт/м² [30].

Как сообщалось выше, баженовская свита является основным источником формирования залежей УВ в ловушках верхнеюрского и мелового НГК, а также возможной сланцевой формацией. В этой связи важно оценить согласованность очагов интенсивной генерации баженовских нефтей, выделенных по геотемпературному критерию в разрезах скважин, с результатами испытаний верхнеюрских и нижнемеловых пластов (табл. 1). Но, к сожалению, в этих скважинах верхнеюрский НГК не испытывался, а нижнемеловые пласты испытаны только в скважине Ростовцевская 64. Результаты испытаний пластов ахской свиты в целом положительные и подтверждают очаг генерации нефти в разрезе скважины Ростовцевская 64. А для интенсификации притока при испытании непосредственно баженовской свиты вероятно требуются специальные работы – возможно, горизонтальный ствол и гидроразрыв пласта.

Сопоставление и обсуждение результатов исследований

Сопоставление измеренных и расчетных геотемператур (табл. 4) позволяет заключить, что по классическому геофизическому критерию – критерию «невязки» – результаты *только вариантов* 3, 4 и 5 оптимальны (приемлемы) и равноценны. Учет «арктического» векового хода температур, неоплейстоценовой мерзлоты и ледникового покрова позволило достаточно корректно восстановить термическую историю баженовских отложений. Учет палеоклимата обуславливает увеличение расчетного палеотемпературного максимума в истории материнских отложений на площадях пва Ямал, на 10–13 °С.

Полученные результаты по арктическому району Западной Сибири вполне согласуются с характером ранее полученных оценок существенного влияния мезозойско-кайнозойского климата, включая резкое похолодание в конце плиоцена, на геотермический режим осадочного чехла юго-востока Западной Сибири [31].

Вариант 4, учитывающий «арктический» вековой ход температур на земной поверхности и неоплейстоценовую мерзлоту – факторы палеоклимата, оптимальный по сходимости («невязке») измеренных и расчетных геотемператур, представляет наиболее «богатую» термическую историю материнских баженовских отложений, а следовательно, обеспечивает наибольшую расчетную плотность ресурсов генерированных нефтей (табл. 5).

Учет ледникового покрова (*вариант 5*) мало повлиял (по отношению к *варианту 4*) и на величину расчетного значения плотности теплового потока из основания q, и на интенсивность и продолжительность ГФН, и на экспресс-оценку генерирован-

- Таблица 5. Расчет интегрального показателя R, дающего экспресс-оценку плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей
- Table 5.
 Calculation of the integrated indicator R giving the express assessment of density of resources of the generated Bazhenov oil

Bариант палеотемпературного моделирования Variant of paleo temperature modeling	Экспресс-расчет ресурсов (<i>R</i>), усл. ед Express calculation of resources (<i>R</i>), сu.	Период работы палеоочага млн лет назад Period of the work of the paleohearth, million years ago	Время работы палеоочага, млн лет Lifetime of the paleohearth, million years	Расчетная плотность теплового потока из основания осадочного разреза, м BT/M^2 Settlement density of a thermal stream from the basis of a sedimentary section, m W/m^2	Максимальные геотемпературы палеоочага генерации нефти, °C Maximum geotemperatures of the paleohearth oil generation, °C	
C	кважи	на Арктическа	я 11/А	rcticheskaya 11 w	rell	
Вариант 1 Variant 1	52	50,4-0,0	50,4	56	119	
Вариант 2 Variant 2	97	92,0-0,0	92,0	54	125	
Вариант 3 Variant 3	69	85,0-3,2; 0,52-0,0	82,3	56	128	
Вариант 4 Variant 4	102	92,0-0,2; 0,12-0,0	91,9	58	132	
Вариант 5 Variant 5	98	89,0-0,5167; 0,070-0,0	88,6	58	130	
Скважи	на Сре	дне-Ямальска	ія 14/Si	redne-Yamalska	ya 14 well	
Вариант 1 Variant 1	53	50,4-0,0	50,4	54	117	
Вариант 2 Variant 2	77	73,0-0,0	73,0	50	117	
Вариант 3 Variant 3	72	70,0-3,2	66,8	51	118	
Вариант 4 Variant 4	73	70,0-3,2	66,8	51	118	
Вариант 5 Variant 5	71	70,0-3,2	66,8	51	117	
Сква	жина	Ростовцевская	64/Rc	ostovtsevskaya 6	4 well	
Вариант 1 Variant 1	Вариант 1 Variant 1 51		50,4	49	109	
Вариант 2 Variant 2	77	73,0-0,0),0 73,0 47		113	
Вариант 3 Variant 3	77	77 73,0-3,2; 0,24-0,0 70		49	117	
Вариант 4 Variant 4	76	73,0-0,5167; 0,07-0,0	72,6	50	119	
Вариант 5 Variant 5	77	73,0-3,2; 0,52-0,5167; 0,04-0,0	69,8	49	116	

Примечание. Коричневой заливкой показаны варианты, оптимальные (приемлемые) по критерию «невязки».

Note. The optimal variants (accepted) by «residual» criterion are showed in brown filling.

ных ресурсов УВ (табл. 5). Такой результат объясняется тем, что «возмущения» тепловой модели (температур, теплофизических свойств) в верхней части разреза «доходят» в полной мере на глубины порядка 3000 м не ранее чем через 0,2–0,3 млн лет. Такое «запаздывание» было установлено нами и ранее [19, 32]. Очевидно, что это «запаздывание» в большей степени касается влияния ледниковых покровов, возраст которых принят 0,18 млн лет.

Вместе с тем можно отметить (табл. 3), что включение в модель динамики вечномерзлых пород (возраст 0,52 млн лет) закрывает «холодное» окно геотемператур баженовской свиты в период 1,80–0,52 млн лет назад, присутствующее в *варианme* 3 и обусловленное резким похолоданием на земной поверхности в этот период. Но, в свою очередь, с началом формирования вечномерзлых пород открывается «холодное» окно начиная с 0,24 млн лет назад (*вариант* 4), увеличиваясь в продолжительности при учете ледникового покрова (*вариант* 5).

Если принять во внимание полученные нами результаты, то можно констатировать несущественное влияние ледникового покрова (на землях п-ва Ямал) на термический режим материнских баженовских отложений, имеющий ключевое значение в процессах генерации УВ. Однако остается невыясненной роль ледников как фактора дополнительного давления на осадочный чехол, влияющего на генерацию и формирование залежей УВ.

В рамках принятой нами модели среды – твердое тело, горизонтальная слоистость - вполне адекватно описываются процессы теплопереноса для «плитной» осадочной толщи, при условии существенного превалирования кондуктивного механизма переноса тепла [33]. Названными условиями характеризуется Западно-Сибирская плита. Здесь магматические и гидротермальные процессы незначительны, отсутствуют или затухли 160-190 млн лет назад. Но в части механизма передачи давления для твердого тела дело обстоит не так. Дополнительно возникающее давление передается почти мгновенно, со скоростью сейсмической волны [34]. Для осадочного разреза п-ва Ямал дополнительное давление на баженовскую свиту от слоя льда мощностью 500-1500 м составит добавку от 7 до 20 %. Вместе с тем, поскольку осадочный разрез преимущественно горизонтально слоистый, каких-то аномальных (отличных от литостатического) давлений, напряжений и смещений среды в гравитационном поле не будет.

Выводы

1. Рассмотрение проблемы совершенствования технологий прогнозирования нефтегазоносности в арктических районах Западной Сибири, выполняемого объемно-генетическим методом, показало актуальность количественной оценки и учета роли мезозойско-кайнозойского климата, в частности вечномерзлых пород и ледников в позднечетвертичное время.

- 2. Выделены три основных палеоклиматических фактора Севера Западной Сибири, вероятно влияющих на реконструируемый геотермический режим осадочного разреза, включая нефтематеринские отложения: 1-й фактор вековой ход температур на поверхности Земли; 2-й фактор формирование и деградация неоплейстоценовой толщи вечномерзлых пород; 3-й фактор позднечетвертичные ледниковые покровы.
- 3. Сформулирована задача дальнейших исследований роли 1-го и 2-го факторов палеоклимата, впервые с комплексным учетом 3-го фактора, в реконструкциях геотермического режима нефтематеринских баженовских отложений и в расчете степени реализации их генерационного потенциала.
- 4. Реализована методика исследований, которая основывается: 1) на палеотемпературном моделировании, наиболее полно учитывающем параметры тектоно-седиментационной истории и истории теплофизических свойств осадочной толщи, измеренные пластовые температуры и палеотемпературы, определенные по данным ОСВ; 2) многовариантности палеотектонических и палеотемпературных реконструкций и на анализе вариабельности результатов; 3) оценке соответствия результатов общепринятым критериям оптимальности решения обратной задачи геофизики; 4) согласованности расчетных значений плотности теплового потока с данными экспериментального определения плотности теплового потока на территории исследований.
- 5. На представительных мезозойского-кайнозойских разрезах месторождений п-ва Ямал (скважины Арктическая 11, Средне-Ямальская 14, Ростовцевская 64) установлено, что неучет «арктического» векового хода температур на поверхности Земли и толщи неоплейстоценовой мерзлоты не позволяет адекватно восстановить термическую историю баженовских отложений.
- 6. Достоверность результатов палеотемпературного моделирования уверенно контролируется сопоставлением с экспериментальными данными о тепловом потоке на территории исследований.
- 7. При определении ресурсов УВ объёмно-генетическим методом на землях арктического региона Западной Сибири рекомендуется применять «арктический» вековой ход температур и учитывать динамику толщи неоплейстоценовой мерзлоты мощностью 300-600 м. В случае неучета толщ вечной мерзлоты и палеоклиматического хода температур расчетные ресурсы УВ могут быть занижены до 40-50 %.
- 8. Полученные нами первые результаты по оценке роли позднечетвертичных ледниковых покровов (в районе п-ва Ямал) позволили отметить несущественное влияние ледникового по-

крова на термический режим материнских баженовских отложений, имеющий ключевое значение в процессах генерации УВ.

Заключение

Объектом проведенных исследований был геотермический режим нефтематеринской баженовской свиты, которая является основным источником формирования залежей УВ в ловушках верхнеюрского и мелового НГК, а также возможной сланцевой формацией арктического региона Западной Сибири. Вместе с тем представляет несомненный интерес для исследований геотермический режим китербютской свиты (J₁kt), являющейся источником формирования залежей УВ в ловушках нижнеюрского и, возможно, доюрского НГК. Глинистая толща китербютская, обладающая нефтематеринским потенциалом, формируется во времена бореальных трансгрессий в ранней юре [35].

Как уже отмечалось, добавка к литостатическому давлению за счет ледниковых покровов может составить 7-20 %, чем, возможно, нельзя пренебрегать. Кроме того, материал горных пород обладает диффузионной и дислокационной ползучестью [36]. При небольших глубинах преобладает диффузионная ползучесть. При такой ползучести среда ведет себя как ньютоновская несжимаемая сильно вязкая жидкость: вязкость порядка 10¹⁹-10²¹ Пуаз. В этом случае смещения точек среды могут составить несколько см/год. Учитывая скорость диффузионного смещения, «волна» аномальных диффузионных деформаций, обусловленная ледниковыми покровами, достигает глубин залегания баженовской свиты не позже, чем через 0,3 млн лет. Таким образом, дополнительное давление ледников по механизму диффузионной ползучести вероятно и может влиять на генерацию УВ.

Возможность выявления перерывов осадконакопления и денудации методом геотермии, как

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Конторович А.Э. Проблемы реиндустриализации нефтегазового комплекса России // Нефтяное хозяйство. 2016. № 3. С. 14–15.
- Tissot B.P. Preliminary Data on the Mechanisms and Kinetics of the Formation of Petroleum in Sediments. Computer Simulation of a Reaction Flowsheet // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. – 2003. – V. 58. – № 2. – P. 183–202.
- Historical-geological modeling of hydrocarbon generation in the Mesozoic-Cenozoic sedimentary basin of the Kara sea (basin modeling) / A.E. Kontorovich, L.M. Burshtein, N.A. Malyshev, P.I. Safronov, S.A. Gusrkov, S.V. Ershov, V.A. Kazanenkov, N.S. Kim, V.A. Kontorovich, E.A. Kostyreva, V.N. Melenevsky, V.R., Livshits A.A. Polyakov, M.B. Skvortsov // Russian Geology and Geophysics. - 2013. - V. 54. - № 8. - P. 1179-1226.
- Искоркина А.А. Палеоклиматические факторы реконструкции термической истории нефтематеринской баженовской свиты арктического региона Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 8. – С. 59–73.
- Influence of Surface Temperatures on Source Rock Maturity: an Example from the Russian Artic / S. Nelskamp, T. Donders, J.-D. van Wess, O. Abbink // ROGTEC. – 2014. – № 18. – P. 26–35.

методом, иным по физическим основам, наряду с геологическими методами и сейсморазведкой, существенно повышает достоверность знаний об истории геологического развития регионов Западной Сибири. Такая возможность особенно актуальна для северных районов Западно-Сибирской НГП, где по первым нашим оценкам, приведенным выше, размывы толщ палеоген-неогеновых пород достигают 400–600 м. В то время как для южного региона Западной Сибири размывы либо вообще не фиксируются, либо оцениваются в пределах 50–100 м.

Полученные первые результаты исследований по выявлению и учету параметров перерывов осадконакопления и денудаций в комплексе с уникальными палеоклиматическими характеристиками Севера Сибири (вековой ход температур на земной поверхности, динамика плиоцен-четвертичных толщ вечномерзлых пород и динамика четвертичных ледниковых покровов) позволили сделать выводы и дать первые рекомендации. А именно, как адекватно восстановить термическую историю нефтематеринских баженовских отложений, а следовательно, повысить достоверность подсчета ресурсов УВ объемно-генетическим методом.

Таким образом, на очереди стоят следующие исследования для условий арктических районов Западной Сибири: 1) оценка роли палеоклиматических факторов реконструкции термической истории китербютской свиты; 2) разработка формализованных сценариев и критериев выявления и количественной оценки параметров перерывов осадконакопления и размывов по данным геотермии; 3) аргументированная оценка влияние роли ледников как фактора дополнительного давления на осадочный чехол, влияющего на генерацию и формирование залежей УВ.

Статья подготовлена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00080 мол_а.

- Баулин В.В. Многолетнемералые породы нефтегазоносных районов СССР. – М.: Недра, 1985. – 176 с.
- Глобальные изменения климата и природной среды позднего кайнозоя в Сибири / отв. ред. А.П. Деревянко. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 511 с.
- Палеогеография Западно-Сибирской равнины в максимум позднезырянского оледенения / С.А. Архипов, В.И. Астахов, И.А. Волков, В.С. Волкова, В.А. Панычев. – Новосибирск: Наука, 1980. – 103 с.
- Томирдиаро С.В. Оледенения Арктического бассейна в плейстоцене и его связь с наземным и подземным оледенением суши // Гляциологические исследования в полярных странах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – С. 172–182.
- Лаухин С.А., Пушкарь В.С., Черепанова М.В. Современное состояние реконструкций природной среды на севере Сибири в каргинское время (поздний плейстоцен) // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2012. – Т. 87. – № 6. – С. 37–48.
- Четвертичные оледенения Западной Сибири и других областей Северного полушария / под ред. С.А. Архипова, А.А. Величко. – Новосибирск: Наука, 1981. – 201 с.
- Артюшков Е.В. Четвертичные оледенения и трансгрессии в Западной Сибири // Изв. АН СССР, сер. геол. – 1969. – № 7. – С. 98–114.

- Баду Ю.Б. Влияние газоносных структур на мощность криогенной толщи Ямала // Криосфера Земли. – 2014. – Т. XVIII. – № 3. – С. 11–22.
- 14. Районирование баженовской свиты и клиноформ неокома по плотности ресурсов сланцевой и первично-аккумулированной нефти (на примере Нюрольской мегавпадины) / В.И. Исаев, Г.А. Лобова, А.К. Мазуров, А.Н. Фомин, В.И. Старостенко // Геофизический журнал. – 2016. – Т. 38. – № 3. – С. 29–51.
- Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кн. 9: Кайнозой Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 246 с.
- Tectonic structure and history of evolution of the West Siberian geosyneclise in the Mesozoic and Cenozoic / V.A. Kontorovich, S.Yu. Belyaev, A.E. Kontorovich, V.O. Krasavchikov, A.A. Kontorovich, O.I. Suprunenko // Russian Geology and Geophysics. – 2001. – V. 42. – P. 1832–1845.
- История тектонического развития арктических районов Западно-Сибирской геосинеклизы в кайнозойское время / С.Ю. Беляев, С.А. Гуськов, В.С. Волкова, А.В. Истомин // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 2. № 1. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-tektonicheskogo-razvitiya-arkticheskih-rayonov-zapadno-sibirskoy-geosineklizy-v-kaynozoyskoe-vremya (дата обращения 26.11.2016).
- Volkova V.S. Geologic stages of the paleogene and neogene evolution of the Arctic shelf in the Obr region (West Siberia) // Russian Geology and Geophysics. 2014. V. 55. № 4. P. 619-633.
- Isaev V.I., Fomin A.N. Loki of generation of bazhenov- and togurtype oils in the southern Nyurol'ka megadepression // Russian Geology and Geophysics. - 2006. - V. 47. - № 6. - P. 734-745.
- Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data / R.Yu. Gulenok, V.I. Isaev, V.Yu. Kosygin, G.A. Lobova, V.I. Starostenko // Russian Journal of Pacific Geology. 2011. V. 5. № 4. P. 273-287.
- Модель катагенеза органического вещества (на примере баженовской свиты) / Л.М. Бурштейн, Л.В. Жидкова, А.Э. Конторович, В.Н. Меленевский // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.
- Strakhov V.N., Golizdra G.Ya., Starostenko V.I. Theory and practice of interpreting potential fields: Evolution in the 20th century // Izvestiya – Physics of the Solid Earth. – 2000. – V. 36. – № 9. – P. 742–762.
- Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyurol'ka megadepression // Russian Geology and Geophysics. - 2014. -V. 55. - P. 1418-1428.

- 24. Galushkin Y.I., Sitar K.A., Kunitsyna A.V. Numerical modeling of the organic matter transformation in the sedimentary rocks of the northeastern Sakhalin shelf // Oceanology. – 2011. – V. 51. – № 3. – P. 491–501.
- 25. Razvozzhaeva E.P., Kirillova G.L., Prokhorova P.N. Comparative analysis of fragments of the Mesozoic East Asian continental margin: the Kyndal (Bureya Basin, Russia) and Suibin (Sanjiang Basin, China) troughs // Russian Journal of Pacific Geology. 2014. V. 8. № 6. P. 404–422.
- 26. Эволюция температурного поля осадочного чехла Западно-Сибирской плиты / А.Д. Дучков, Ю.И. Галушкин, Л.В. Смирнов, Л.С. Соколова // Геология и геофизика. – 1990. – № 10. – С. 51–60.
- Kurchikov A.R. The geothermal regime of hydrocarbon pools in West Siberia // Russian Geology and Geophysics. - 2001. -V. 42. - № 11-12. - P. 678-689.
- Лопатин Н.В. Концепция нефтегазовых генерационно-аккумуляционных систем как интегрирующее начало в обосновании поисково-разведочных работ // Геоинформатика. – 2006. – № 3. – С. 101–120.
- Галушкин Ю.И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазоносности. – М.: Научный Мир, 2007. – 456 с.
- Геотермия арктических морей / М.Д. Хуторской, В.Р. Ахмедзянов, А.В. Ермаков, Ю.Г. Леонов, Л.В. Подгорных, Б.Г. Поляк, Е.А. Сухих, Л.А. Цыбуля. М.: ГЕОС, 2013. 232 с.
- Палеоклиматические факторы реконструкции термической истории баженовской и тогурской свит юго-востока Западной Сибири / В.И. Исаев, А.А. Искоркина, Г.А. Лобова, А.Н. Фомин // Геофизический журнал. 2016. Т. 38. № 4. С. 3–25.
- 32. Нефтегазоносность нижнемеловых резервуаров Нюрольской мегавпадины / Е.Н. Осипова, Г.А. Лобова, В.И. Исаев, В.И. Старостенко // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 14–33.
- Хуторской М.Д. Введение в геотермию. М.: Изд-во РУДН, 1996. – 156 с.
- Nadai A. Theory of Flow and Fracture of Solids. V. 2. New York: McGraw-Hill Book Company, 1963. – 705 p.
- 35. Богоявленская В.И., Полякова И.Д. Перспективы нефтегазоносности больших глубин Южно-Карского региона // Арктика: экология и экономика. – 2012. – № 3 (7). – С. 92–103.
- 36. Cserepes L., Yuen D.A., Schroeder B.A. Effect of the mid-mantle viscosity and phase-transition structure on 3D mantle convection // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2000. V. 118. № 1–2. P. 125–148.

Поступила 28.11.2016 г.

Информация об авторах

Исаев В.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Искоркина А.А., аспирант кафедры геофизики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Косыгин В.Ю., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Вычислительного центра ДВО РАН.

Лобова Г.А., доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Осипова Е.Н., кандидат геолого-минералогических наук, ассистент кафедры геофизики Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Фомин *А.Н.*, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 553.98(571)

INTEGRATED ASSESSMENT OF PALEOCLIMATE FACTORS OF RECONSTRUCTING THERMAL HISTORY OF PETROMATERNAL BAZHENOV SUITE IN ARCTIC REGIONS OF WESTERN SIBERIA

Valeriy I. Isaev¹, isaevvi@tpu.ru

Albina A. Iskorkina¹, iskorkina.a@mail.ru

Vladimir Yu. Kosygin², kosyginv@inbox.ru

Galina A. Lobova¹, lobovaga@tpu.ru

Elizaveta N. Osipova¹, osipovaen@list.ru

Aleksandr N. Fomin³,

fominan@ipgg.sbras.ru

- ¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.
- ² Computer center of the FEB RAS,
 65, Kym St. Yu Chen street, Khabarovsk, 680000, Russia.
- ³ Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS, 3, Ac. Koptueg Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance. The Arctic regions of Western Siberia have the unique paleoclimate features, the inversion tectonic history in Paleogene-Neogene and the considerable variations of geochemical characteristics of petromaternal deposits. This causes the necessity to improve schemes and parameters of quantitative assessment of hydrocarbon resources by volume and genetic method based on paleoreconstruction of geotemperature mode of petromaternal deposits.

The main aim of research is to estimate the impact of paleoclimate factors – temperature secular variation of the Earth surface and Neo-Pleistocene permafrost thickness, glacial sheets, in a complex with a factor of erosive processes, on the settlement geothermal mode of petromaternal of Bazhenov suite.

Object of researches: Bazhenov deposits of Mesozoic and Cenozoic sections, opened deep wells on Arctic, Sredne-Yamal and Rostov areas (Yamal Peninsula).

The method of research is based on original computer paleotemperature modeling considering the parameters of sedimentation history and the history of thermal properties of sedimentary thickness, including permafrost rocks and glaciers, without aprioristic data on sizes and the nature of a deep heat flow.

Research results on identification and registration of denudation parameters in conjunction with the assessment of the role and taking into account the characteristics of paleoclimatic features allowed making the conclusions and recommendations. It is recommended to apply «Arctic» secular variation of temperature and take into account the dynamics of Neo-Pleistocene permafrost strata of about 300–600 meters when determining the hydrocarbon resources by the volumetric-genetic method in the territory of Arctic region. Calculation hydrocarbon resources may be understated by 40–50 % in case if not taking into account permafrost and paleoclimatic secular variation of temperatures. The authors have stated the tasks of forthcoming researches, including the estimate of the role of paleoclimatic factors in thermal history of Kiterbyut source formation and elaboration of formalized scenarios for identifying and estimating the interruptions in sedimentation and erosion according to the geothermic data.

Key words:

Paleoclimate, inversion tectonic, geotemperature mode, petromaternal Bazhenov deposits, Yamal Peninsula.

The paper was partially financially supported by the RFBR within the scientific project no. 16-35-00080 мол a.

REFERENCES

- Kontorovich A.E. Problems of reindustrialization of oil and gas complex of Russia. Neftyanoe xozyaystvo - Oil Industry, 2016, no. 3, pp. 14-15. In Rus.
- 2. Tissot B. Preliminary Data on the Mechanisms and Kinetics of the Formation of Petroleum in Sediments. Computer Simulation of a

Reaction Flowsheet. Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, 2003, vol. 58, no. 2, pp. 183–202.

 Kontorovich A.E., Burshtein L.M., Malyshev N.A., Safronov P.I., Gusrkov S.A., Ershov S.V., Kazanenkov V.A., Kim N.S., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Melenevskiy V.N., Livshits V.R., Polyakov A.A., Skvortsov M.B. Historical-geological modeling of hydrocarbon generation in the Mesozoic–Cenozoic sedimentary basin of the Kara sea (basin modeling). *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 1179–1226.

- Iskorkina A.A. Paleoclimate factors of reconstruction of thermal history of the petromaternal Bazhenov shale of the Arctic region of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 8, pp. 59–73. In Rus.
- Nelskamp S., Donders T., van Wess J.-D., Abbink O. Influence of Surface Temperatures on Source Rock Maturity: an Example from the Russian Artic. *ROGTEC*, 2014, no. 18, pp. 26–35.
- Baulin V.V. Mnogoletnemerzlye porody neftegazonosnykh rayonov SSSR [Permofrost rock of oil-and-gas regions of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 176 p.
- Derevyanko A.P. Globalnye izmeneniya klimata i prirodnoy sredy pozdnego kaynozoya v Sibiri [Global changes of climate and environment of the late Cenozoic in Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2008. 511 p.
- Arkhipov S.A., Astakhov V.I., Volkov I.A., Volkova V.S., Panychev V.A. Paleogeografiya Zapadno-Sibirskoy ravniny v maksimum pozdnezyryanskogo oledeneniya [Paleogeography of the West Siberian Plain in a maximum glaciation of the late Zyrian]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 103 p.
- Tomirdiaro S.V. Oledeneniya Arkticheskogo basseyna v pleystocene i ego svyaz s nazemnym i podzemnym oledeneniem sushi [Freezing of the Arctic basin in a Pleistocene and its relation to the land and underground freezing of land]. *Glyatsiologicheskie issledovaniya v polyarnykh stranakh* [Glaciological research in the Polar Regions]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. pp. 172–182.
- Laukhin S.A., Pushkar B.S., Cherepanova M.V. Current state of reconstruction of the environment in the north of Siberia in Karginsk time (late Pleistocene). Bulletin of the Moscow society of testers of the nature. Geological department, 2012, vol. 87, no. 6, pp. 37-48. In Rus.
- Arkhipova S.A., Velichko A.A. Chetvertichnye oledeneniya Zapadnoy Sibiri i drugikh oblastey Severnogo polushariya [Quaternary glaciation of Western Siberia and other regions of the Northern Hemisphere]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 201 p.
- Artyushkov E.V. Chetvertichnye oledeneniya i transgressii v Zapadnoy Sibiri [Quaternary glaciations and transgressions in Western Siberia]. *Izvestiya AN SSSR, ser. Geologiya*, 1969, no. 7, pp. 98–114.
- Badu Yu.B. Influence of gas-bearing structures on the capacity of Yamal cryogenic strata. *Cryosphere of Earth*, 2014, vol. XVIII, no. 3, pp. 11–22. In Rus.
- 14. Isaev V.I., Lobova G.A., Mazurov A.K., Fomin A.N., Starostenko V.I. Zoning of the Bazhenov formation and clinoforms of the Neocom by density of resources of shale and primary accumulated oil (for example, Nurolrka megahollow). *Geofizicheskiy zhurnal – Geophysical journal*, 2016, vol. 38, no. 3, pp. 29–51. In Rus.
- Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Kn. 9: Kaynozoy Zapadnoy Sibiri [Stratigraphy of oil and gas bearing basins of Siberia. B. 9: The Cenozoic of Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002. 246 p.
- Kontorovich V.A., Belyaev S.Yu., Kontorovich A.E., Krasavchikov V.O., Kontorovich A.A., Suprunenko O.I. Tectonic structure and history of evolution of the West Siberian geosyneclise in the Mesozoic and Cenozoic. *Russian Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, pp. 1832–1845.
- Belyaev S.Yu., Guskov S.A., Volkova V.S., Istomin A.V. History of tectonic development of Arctic districts of the West Siberian geosyneclise in Cenozoic. *Interekspo Geo-Siberia*, 2013, vol. 2, no. 1. In Rus. Available at: http://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-tektonicheskogo-razvitiya-arkticheskih-rayonov-zapadnosibirskoy-geosineklizy-v-kaynozoyskoe-vremya (accessed: 26 November 2016).

- Volkova V.S. Geologic stages of the Paleogene and Neogene evolution of the Arctic shelf in the Obr region (West Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 4, pp. 619–633.
- Isaev V.I., Fomin A.N. Loki of generation of bazhenov- and togurtype oils in the southern Nyurol'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 6, pp. 734–745.
- Gulenok R.Yu., Isaev V.I., Kosygin V.Yu., Lobova G.A., Starostenko V.I. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 273-287.
- Burshteyn L.M., Zhidkova L.V., Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N. Model katageneza organicheskogo veshchestva (na primere bazhenovskoy svity) [Model of katagenesis of organic matter (by the example of the Bazhenov formation)]. *Russian Geology* and Geophysics, 1997, vol. 38, no. 6, pp. 1070–1078.
- Strakhov V.N., Golizdra G.Ya., Starostenko V.I. Theory and practice of interpreting potential fields: Evolution in the 20th century. *Izvestiya – Physics of the Solid Earth*, 2000, vol. 36, no. 9, pp. 742–762.
- Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyurolrka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, pp. 1418–1428.
- Galushkin Y.I., Sitar K.A., Kunitsyna A.V. Numerical modeling of the organic matter transformation in the sedimentary rocks of the northeastern Sakhalin shelf. *Oceanology*, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 491–501.
- 25. Razvozzhaeva E.P., Kirillova G.L., Prokhorova P.N. Comparative analysis of fragments of the Mesozoic East Asian continental margin: the Kyndal (Bureya Basin, Russia) and Suibin (Sanjiang Basin, China) troughs. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2014, vol. 8, no. 6, pp. 404–422.
- Duchkov A.D., Galushkin Yu.I., Smirnov L.V., Sokolova L.S. Evoliutsiya temperaturnogo polya osadochnogo chekhla Zapadno-Sibirskoy plity [Evolution of the temperature field of the sedimentary cover of the West Siberian plate]. *Russian Geology and Geophysics*, 1990, vol. 10, pp. 51–60.
- Kurchikov A. R. The geothermal regime of hydrocarbon pools in West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 2001, vol. 42, no. 11–12, pp. 678–689.
- Lopatin N.V. Concept of oil and gas generative and accumulative systems as the integrating beginning in justification of exploration. Geoinformatika, 2006, no. 3, pp. 101–120. In Rus.
- Galushkin Yu.I. Modelirovanie osadochnykh basseynov i otsenka ikh neftegazonosnosti [Modeling decantation basins and assessment of their petroleum potential]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2007. 456 p.
- Khutorskoy M.D., Akhmedzyanov V.R., Ermakov A.V., Leonov Yu.G., Podgornykh L.V., Poliak B.G., Sukhikh E.A., Cybulia L.A. *Geotermiya arkticheskikh morey* [Geothermic of the Arctic seas]. Ed. by Yu.G. Leonov. Moscow, GEOS Publ., 2013. 232 p.
- 31. Isaev V.I., Iskorkina A.A., Lobova G.A., Fomin A.N. Paleoclimatic factors of reconstruction of thermal history of the Bazhenov and Togur suites in the southeast of Western Siberia. *Geofizicheskiy zhurnal – Geophysical journal*, 2016, vol. 38, no. 4, pp. 3–25. In Rus.
- 32. Osipova E.N., Lobova G.A., Isaev V.I., Starostenko V.I. Oil and gas reservoirs of Lower Nurolrka megahollow. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 14–33. In Rus.
- Khutorskoy M.D. Vvedenie v geotermiyu [Introduction into geothermic]. Moscow RUDN Publ., 1996. 156 p.
- Nadai A. Theory of Flow and Fracture of Solids. Vol. 2. New York, McGraw-Hill Book Company, 1963. 705 p.

- Bogoyavlenskaya V.I., Polyakova I.D. Petroleum potential of the great depths of the South Kara region. Arctic: ecology and economy, 2012, no. 3 (7), pp. 92–103. In Rus.
- 36. Cserepes L., Yuen D.A., Schroeder B.A. Effect of the mid-mantle viscosity and phase-transition structure on 3D mantle convec-

tion. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2000, vol. 118, no. 1–2, pp. 125–148.

Received: 28 November 2016.

Information about the authors

Valeriy I. Isaev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Albina A. Iskorkina, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir Yu. Kosygin, Dr. Sc., leading researcher, Computer center of the FEB RAS.

Galina A. Lobova, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elizaveta N. Osipova, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksandr N. Fomin, Dr. Sc., head of the laboratory, Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A.A. Trofimuk SB RAS.